

P. D. ANDRIENKO, O. V. BLYZNIAKOV

**RESEARCH AND TESTING OF
ELECTRICAL AND POWER ELECTRONIC
APPARATUS**

Textbook with Parallel Text

Zaporizhzhia • 2025

П.Д. АНДРІЄНКО, О.В. БЛИЗНЯКОВ

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ
ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА ЕЛЕКТРОННИХ
АПАРАТІВ**

Навчальний посібник с паралельним текстом

Запоріжжя • 2025

УДК: 621.316(075.8)

A 65

*Recommended for publication by the Academic Council
of Zaporizhzhia Polytechnic National University
(minutes No 6 dated January 28, 2025)*

Reviewers:

Je. I. Bajda – Head of the Department "Electrical Apparatus" of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Doctor of Technical Sciences, Professor;

O. P. Chornyj – Professor of the Automatic Control Systems and Electric Drive Department of the Kremenchuk Mykhailo Ostrogradskyi National University, Doctor of Technical Sciences, Professor;

A 65 Andrienko P.D., Blyzniakov O.V.

Research and Testing of Electrical and Power Electronic Apparatus: Textbook with parallel text / P.D. Andrienko, O.V. Blyzniakov – Zaporizhzhia: National University “Zaporizhzhia Polytechnic” Publishing House, 2025 – 335 p.

ISBN 978-617-529-492-5

The classification of tests, their main tasks, as well as organizational issues concerning to research and testing of electrical and power electronic apparatus are considered. The structure of instrumentation of test and experimental installations, functioning and characteristics of their main components, as well as methods of measuring electrical and non-electrical quantities are given. Test and experimental equipment, as well as the main research and testing technologies of electrical and power electronic apparatus are considered.

The study guide is intended for students of higher educational institutions who study in English on the educational program "Electrical and electronic apparatus" of specialty 141 - Elec-tric power, electrical and electromechanical engineering.

УДК 621.316(075.8)

ISBN 978-617-529-492-5

© NU "Zaporizhzhya Polytechnic", 2025

© Andrienko P.D., Blyzniakov O.V., 2025

УДК: 621.316(075.8)

А 65

*Рекомендовано до друку вченою радою
національного університету «Запорізька політехніка»
(протокол № 6 від 28 січня 2025 року)*

Рецензенти:

Байда Є. І. – завідувач кафедри «Електричні апарати» національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», доктор технічних наук, професор;

Чорний О. П. – професор кафедри систем автоматичного управління та електроприводу Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, доктор технічних наук, професор;

А 65 Андрієнко П.Д., Близняков О. В.

Дослідження та випробування електричних та електронних апаратів: Навчальний посібник з паралельним текстом / П.Д. Андрієнко, О.В. Близняков. – Запоріжжя: видавництво НУ «Запорізька політехніка», 2025 – 335 с.

ISBN 978-617-529-492-5

Розглянуто класифікацію випробувань, їх основні задачі, а також організаційні питання щодо дослідження та випробування електричних та електронних апаратів. Надано структуру вимірювальних пристроїв випробних та експериментальних установок, функціонування та характеристики їх основних елементів, а також методи вимірювання електричних та неелектричних величин. Розглянуто випробне та експериментальне обладнання, а та-кож основні методи досліджень та випробувань електричних та електронних апаратів.

Навчальний посібник призначений для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються англійською мовою за освітньою програмою «Електричні та електронні апарати» спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

УДК 621.316(075.8)

ISBN 978-617-529-492-5

© НУ «Запорізька політехніка», 2025

© Андрієнко П.Д., Близняков О.В., 2025

CONTENT

PREFACE	9
1. GENERAL ISSUES OF RESEARCH AND TESTING OF ELECTRICAL AND POWER ELECTRONIC APPARATUS	13
1.1 R&D Works: Notion, Classification, and Content	13
1.2 Basic Principles of Designing an Experiment	25
1.3 Testing: Notion, Content, and Engineering Specifications.....	45
1.4 Classification of Tests	49
1.5 Technical Means for Conduction of Research and Testing.....	57
1.6 Requirements to Electrical and Power Electronic Apparatus.....	59
2. MEASURING SYSTEMS OF TEST SETUPS AND MEASURING TECHNIQUES	71
2.1 Basic Concepts. A Brief Description of the Measurands	71
2.2 Structure of Measuring Circuits Their Components.....	75
2.3 Measuring Transducers: Classification and Basic Performances	85
2.4 Voltage Measurements	99
2.5 Current Measurements.....	117
2.6 Electric Power and Energy Measurements	129
2.7 Measurement of Volt-ampere Characteristics	131
2.8 Measurement of Dielectric Recovery and Post-Arc Current	133
2.9 Measurement of Non-Electrical Parameters	141
3. DIELECTRIC RESEARCH AND TESTS	161
3.1 Techniques of Dielectric Research and Tests.....	161
3.2 Content of the Tests and Test Equipment.....	167
3.3 Impulse Withstand Voltage Tests.....	171
3.4 Applied Withstand Voltage Tests.....	181
3.5 Other Techniques of Dielectric Research and Tests.....	197
4. SWITCHING TESTS OF ELECTRICAL APPARATUS	217
4.1 Adjustment of the Test Circuit	219
4.2 Power Supply Sources for Test Setups.....	229
4.3 Testing of LV Apparatus	241
4.4 Testing of HV Circuit Breakers: Test Content	249
4.5 Synthetic Testing of HV Circuit Breakers.....	251

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	10
1. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ВИПРОБУВАНЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА ЕЛЕКТРОННИХ АПАРАТІВ	14
1.1 НДР та ДКР: поняття, класифікація, зміст.....	14
1.2 Основні принципи планування експерименту.....	26
1.3 Випробування: поняття, зміст, технічна документація.....	46
1.4 Класифікація випробувань.....	50
1.5 Технічні засоби для проведення досліджень та випробувань	58
1.6 Вимоги до електричних та електронних апаратів	60
2. ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ ВИПРОБНИХ УСТАНОВОК ТА МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ	72
2.1 Основні поняття. Стисла характеристика вимірюваних параметрів	72
2.2 Структура вимірювальних пристроїв та їх елементи.....	76
2.3 Вимірювальні перетворювачі: класифікація, основні характеристики	86
2.4 Вимірювання напруг	100
2.5 Вимірювання струмів	118
2.6 Вимірювання електричної потужності й енергії	130
2.7 Зняття вольт-амперних характеристик	132
2.8 Вимірювання поновлюваної міцності та залишкових струмів	134
2.9 Вимірювання неелектричних параметрів.....	142
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ ІЗОЛЯЦІЇ	162
3.1 Методи дослідження та випробування ізоляції	162
3.2 Зміст випробувань та випробне устаткування	168
3.3 Випробування імпульсною напругою	172
3.4 Випробування прикладеною напругою	182
3.5 Інші методи дослідження та випробування ізоляції.....	198
4. КОМУТАЦІЙНІ ВИПРОБУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ	218
4.1 Налаштування випробного контуру	220
4.2 Джерела живлення випробних установок	230
4.3 Випробування апаратів низької напруги.....	242
4.4 Випробування вимикачів високої напруги: зміст випробувань ...	250
4.5 Синтетичні випробування високовольтних вимикачів	252

5. OTHER TESTING TECHNIQUES OF ELECTRICAL AND POWER ELECTRONIC APPARATUS	273
5.1 Research and Testing for Temperature-rise in Rated Duty	273
5.2 Peak and Short-time Withstand Current Tests.....	279
5.3 Electromechanical and Electromagnetic Research and Testing	281
5.4 Electrical Tests of Power Electronic Apparatus	285
5.5 Non-electrical Checks and Tests	297
APPENDIX A. Review Questions	311
REFERENCE LIST	327

5. ІНШІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ВИПРОБУВАНЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА ЕЛЕКТРОННИХ АПАРАТІВ.....	274
5.1 Дослідження та випробування на нагрів у номінальному режимі.....	274
5.2 Випробування на стійкість при наскрізних струмах короткого замикання	280
5.3 Електромеханічні та електромагнітні дослідження та випробування.....	282
5.4 Електричні випробування силових електронних апаратів	286
5.5 Неелектричні перевірки та випробування.....	298
ДОДАТОК А. Контрольні питання.....	312
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	328

PREFACE

Electrical and power electronic apparatus (EEA) have a significant place in various industries. They are important components of power supply systems, electric drives, and technological plants, etc., which causes high requirements for their functional characteristics and quality in general. It should be emphasized that this, to a large degree, is determined by the correct organization of research and testing of apparatus in the process of their development until to develop serial production, and then by regular testing in the process of their industrial production and operation. By this why, research and testing are an integral part of the process of creating new EEA and, in general, new equipment and new technologies.

Engineering practice shows that the material and labor costs for carrying out research and testing of the EEA consists significant part of total expenses for their engineering process. Complex, and in some cases, unique equipment is frequently used in the process of EEA research and testing. A large number of engineers in scientific research institutions, in production, as well as organizations involved in operation of electrical equipment are engaged in research and testing EEA. By this why, a present day electrical engineer must have not only, in full degree, knowledge of theory, design methods of EEA, but the questions associated with their theoretical and experimental researches as well as tests being performed during research and development works, industrial production and operation.

In this regard, the curriculum of the second (master's) level of higher education according to the educational program "Electrical and electronic apparatus" of specialty 141 - Electric power, electrical and electromechanical engineering " includes the educational discipline "Research and testing of electrical and electronic apparatus", in which relevant issues are considered. In 2006, a study guide entitled "Research and Testing of Electrical Apparatus" was published for this discipline. The experience of its use in the educational process has shown that the educational manual has a high scientific and methodological level, contains material that is quite useful for the future practical activities of specialists. In 2013, the 2nd edition of this manual was published, which was revised and supplemented. However, nowadays there is a need to significantly update the textbook, as well as supplement it with an English-language version. This is due to:

ПЕРЕДМОВА

Електричні та електронні апарати (ЕЕА) займають чільне місце в різних галузях промисловості. Вони є важливими елементами систем електропостачання, електроприводу, технологічних установок і т.д., що обумовлює високі вимоги до їх функціональних характеристик та якості у цілому. Слід підкреслити, що це, значною мірою, визначається правильною організацією досліджень та випробувань апаратів у процесі їх розробки до освоєння серійного виробництва, а потім і регулярним проведенням випробувань у процесі їх промислового виробництва та експлуатації. Отже, дослідження та випробування є невід'ємною складовою частиною процесу створення нових ЕЕА та, взагалі, нової техніки та нових технологій.

Як показує інженерна практика, матеріальні і трудові витрати на проведення науково-дослідних робіт та випробувань ЕЕА складають значну частину загальних витрат на їх створення, виробництво та експлуатацію. В процесі досліджень та випробувань ЕЕА досить часто використовується складне, а в деяких випадках, унікальне устаткування. Дослідженнями та випробуваннями ЕЕА займаються велика кількість фахівців у науково-дослідних інституціях, на виробництві, а також організаціях, що експлуатують електричне обладнання. Отже, сучасний молодий інженер-електрик повинен повною мірою володіти не тільки питаннями теорії, розрахунку і конструювання ЕЕА, але й питаннями, пов'язаними з їх теоретичними та експериментальними дослідженнями та випробуваннями, що проводяться в процесі науково-дослідних робіт, дослідно-конструкторських робіт, промислового виробництва й експлуатації.

У зв'язку з цим, навчальним планом підготовки фахівців на другому (магістерському) рівні вищої освіти за освітньою програмою «Електричні та електронні апарати» спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» передбачена навчальна дисципліна «Дослідження та випробування електричних та електронних апаратів», в якій розглядаються відповідні питання. За цією дисципліною у 2006 році був виданий навчальний посібник під назвою «Дослідження та випробування електричних апаратів». Досвід використання у навчальному процесі показав, що навчальний посібник має досить високий науково-методичний рівень, містить матеріал, який є досить корисним для майбутньої практичної діяльності фахівців. У 2013 році вийшло 2-е видання цього посібника, яке було перероблене та доповнене. Але у наш час постала необхідність значного оновлення навчального посібника, а також доповнення його англійською мовою версією. Це обумовлено:

- the emergence of new technical and organizational means of research and testing of electrical and power electronic apparatus, which was reflected in scientific and technical (including English-language) publications; it enable us to improve the scientific and methodological level of the manual by using this material;
- the need to consider the specifics of testing power electronic apparatus: rectifiers, inverters, frequency converters, etc.;
- teaching students in English, which requires the study and wide use of special English terminology.

– появою нових технічних та організаційних засобів дослідження та випробування електричних та електронних апаратів, яке знайшло відображення у науково-технічних (у тому числі англомовних) виданнях, що дає можливість покращення науково-методичного рівня навчального посібника шляхом використання цього матеріалу;

– необхідністю розглянути особливості випробувань силових електронних апаратів: випрямлячів, інверторів, перетворювачів частоти та ін.;

– навчання студентів англійською мовою, що потребує вивчення та широкого використання спеціальної англомовної термінології.

1. GENERAL ISSUES OF RESEARCH AND TESTING OF ELECTRICAL AND POWER ELECTRONIC APPARATUS

Modern electric and power electronic apparatus (E&PEA) are quite complex devices. Along with the power component, they usually contain a variety of auxiliary components, such as control systems, mechanisms and devices for measuring and monitoring electric and non-electric quantities, control and interlocking devices. It should also be noted that functioning process of electric and power electronic equipment is frequently accompanied by very complex and variety of phenomena that now still remain to be understood. Therefore, at the present-day there is no real possibility to construct a complex of interrelated mathematic equations that would enable us to design E&PEA without preliminary research and experimental verification of their reliable operation in different conditions, correspondence of their parameters to required (claimed) ones, i.e. without performing all-round (comprehensive) tests.

Thus, the initial stage of the creative process aimed to designing new apparatus is *scientific research work* and *development work*, which are constituent parts of *R&D-works*.

1.1 R&D Works: Notion, Classification, and Content

Research work (R-work) is the one aimed to comprehensive study of phenomena, processes, objects, etc. for the purpose to gain new scientific information (new knowledge) that has convincing proved with the help of *scientific methods* or *methods of scientific cognition*. Research work, in general case, supposes to solve the following basic tasks:

- definition of a specific object under study;
- an all-round study of its structure, characteristics, communications based on the principles and methods of scientific cognition developed in science;
- derivation of useful results for human activity;
- implementation of the results into production and obtaining a positive effect.

1. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ВИПРОБУВАНЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА ЕЛЕКТРОННИХ АПАРАТІВ

Сучасні електричні та електронні апарати (ЕЕА) є досить складними пристроями. Поряд з силовою частиною вони містять різноманітні допоміжні елементи: механізми, пристрої вимірювання та контролю електричних та неелектричних параметрів, пристрої керування та блокування. Слід також зазначити, що процес функціонування ЕЕА часто супроводжується вельми складними і різноманітними явищами; деякі з них на сьогоднішній день залишаються невивченими. Отже сьогодні відсутня реальна можливість скласти комплекс взаємопов'язаних математичних рівнянь, які б дозволили здійснювати проектування апаратів без проведення попередніх досліджень та експериментальної перевірки їх надійного функціонування, забезпечення необхідних (заявлених) параметрів, тобто проведення всебічних випробувань.

Таким чином, початковим етапом творчого процесу створення нових апаратів є *науково-дослідна робота (НДР)* та *дослідно-конструкторська робота (ДКР)*.

1.1 НДР та ДКР: поняття, класифікація, зміст

Науково-дослідною є робота, яка направлена на всебічне вивчення явищ, процесів, об'єктів і т. п. за допомогою наукових методів (*методів наукового пізнання*) з метою отримання нової наукової інформації (переконливо доказаної за допомогою наукових методів). Основними задачами НДР у загальному випадку є:

- визначення конкретного об'єкта дослідження;
- всебічне вивчення його структури, характеристик, зв'язків на основі розроблених у науці принципів і методів пізнання;
- отримання корисних для діяльності людини результатів;
- впровадження результатів НДР у виробництво і отримання позитивного ефекту.

The basic scientific methods are observation and experiment. *Observation* or *observational study* is a scientific method consisting in studying a process or object with no external interference, i.e. influence on it; sometimes observation is called a passive experiment. *Experiment* or *experimental study* is a scientific method, at which the process or investigate object is studied under certain influence on it.

The so-called *logical method* plays an equally important role in the process of R-work. This method enables us, using deductive interpretations, to explain phenomena and processes, set up supposes and ideas, and outline ways to solve the problems under study. It is naturally that the logical method is based upon the findings of observations and experiments.

R-works are usually classified according to various criteria; the most important one is the classification by purpose: in this regard, two main types of R-works are distinguished:

- *basic* or *pure researches*: their main tasks are to expand knowledge about the laws of nature; to create radically new principles;

- *applied* or *goal-oriented research*: their main task is to study and use new methods, principles in order to create new equipment, machines, apparatus, materials, production methods and work organization, etc. Applied research is aimed, as a rule, to develop a specific field of industry.

Basic research is usually *state-budgetary research*, i.e. ones financed from means of the state budget. Applied researches may be *state-budgetary* or *economic-contractive*, i.e. ones financed according to contract agreed between the customer (the institution using the research findings) and the contractor (the institution performing the R-work).

Depending on the duration, there are *long-term R-works* (performed over a period of several years) and *short-term R-works* (the duration is usually one year).

R-work is performed in a certain logical sequence. The process of implementing applied R-works generally includes six stages.

The first stage usually consists in statement of subject-matter of the research. The content of this stage is as follows: general consideration of the problem supposed to perform the R-work; preliminary acquaintance with the literature and classification of the most important directions; formulation of the subject matter of the R-work; drawing up an annotation (shorthand schedule) of the R-work; development of request for proposal; short-cut estimation of cost effect expectancy.

Основними методами наукового пізнання є спостереження та експеримент. *Спостереження* це метод наукового пізнання, коли об'єкт вивчається без втручання у нього; іноді спостереження називають пасивним експериментом. *Експеримент* – у загальному випадку процес або об'єкт, що досліджується, вивчається при певних втручаннях у нього.

Не менш важливу роль в процесі наукового пізнання відіграє *логічний метод*, який дозволяє на основі умоглядних трактувань пояснювати явища і процеси, висувати припущення та ідеї, накреслювати шляхи вирішення проблем, що вивчаються. Логічний метод базується, звичайно, на результатах спостережень та експериментів.

НДР за звичаєм класифікують за різними ознаками; найбільш важливою є класифікація за цільовим призначенням. У цьому відношенні розрізняють дві основні різновиди НДР:

– *фундаментальні дослідження*: їх основними задачами є розширення знань про закони природи; створення зовсім нових принципів;

– *прикладні дослідження*: їх основним завданням є вивчення та використання нових методів, принципів з метою створення нового обладнання, машин, апаратів, матеріалів, способів виробництва та організації робіт і т. д. Прикладні дослідження спрямовані, як правило, на розвиток конкретної галузі виробництва.

Фундаментальні дослідження є, як правило, *держбюджетними*, тобто такими, що фінансуються за кошти державного бюджету. Прикладні дослідження можуть бути *держбюджетними* або *господогвірними*, тобто такими, що фінансуються у відповідності до договорів, що укладені між замовником (підприємством, що використовує результати НДР) та виконавцем (організацією, яка здійснює НДР).

В залежності від тривалості існують *довготермінові НДР* (що здійснюються впродовж декількох років) та *короткотермінові НДР* (як правило, один рік).

НДР проводять у певній логічній послідовності. Процес виконання прикладних НДР у загальному випадку містить у собі шість етапів.

1-й етап – формулювання теми. На цьому етапі здійснюється: загальне ознайомлення з проблемою, по якій передбачається проведення НДР; попереднє ознайомлення з літературою; класифікація важливіших напрямків; формулювання теми НДР; складання анотації (стислого плану) НДР; розробка технічного завдання; попереднє визначення очікуваного економічного ефекту.

The second stage usually consists in statement of the purpose and problems of the R-work. The content of this stage is as follows: selection and listing of bibliography (monographs, textbooks, articles, etc.) according to the R-work subject-matter; the abstracts on the R-work subject-matter are drawn up; critical analysis and generalization of the available files on the subject; formulation of methodical deductions as for the information overview, as well as purpose and problems of the R-work.

The third stage is *theoretical research* or *theoretic study*. This is the most creative part of the R-work. In the process of theoretical research, the methods of deduction and induction are of vital importance. *Deduction* is a mean of research, at which particular provisions are derived from general ones. For example, using the general laws of electricity, equations for electrical circuits are derived and so forth. *Induction*, by contrast, in this case basing upon individual facts and phenomena, general principles and laws are established. Methods of analysis and synthesis play a special role in theoretical research. *Analysis* is a method of scientific research when the phenomenon (object) being investigated is separated into its constituent components. *Synthesis* is a method reverse to analysis that consists in the study of the phenomenon or object as a whole with consideration of the interaction between its constituent components.

It should be noted, however, that the main method, extensively used in applied research, is the *hypothetical method* based upon the development of a *hypothesis*, i.e. scientific supposition containing elements of newness and originality. There is also a so-called *axiomatic method* based upon evident postulations (axioms) accepted without proof. However, it is more common in theoretical sciences, such as mathematic, mathematical statistics etc. The foundation of applied researches is hypothetical method including the following elements:

- studying the physical essence of the phenomena or object being researched with the help of the foregoing methods: deduction, induction, analysis, synthesis;

- formulation of a hypothesis and construction of a physical model (simulation) of the process or object being researched; this element is key one in the methodology of hypothetical method;

2-й етап – формулювання мети і задач НДР: на цьому етапі здійснюється підбір і складання бібліографічних списків літератури (монографій, підручників, статей та ін.) по темі НДР; складання рефератів по темі НДР; вивчення звітів з НДР різних організацій відповідного профілю; складання анотацій джерел; критичний аналіз, узагальнення наявного матеріалу за темою науково-дослідної роботи; формулювання методичних висновків з огляду інформації, мети і задачі дослідження.

3-й етап – теоретичні дослідження: це найбільш творча частина НДР. Важливе місце в процесі теоретичних досліджень займають способи дедукції і індукції. *Дедукція* – являє собою спосіб дослідження, при якому окремі положення виводяться з загальних. Наприклад, на основі загальних законів електрики отримують рівняння електричних кіл і т. п. *Індукція* – у даному випадку, навпаки, по окремим фактам та явищам встановлюють загальні принципи і закони. Даний спосіб широко використовується в теоретичних дослідженнях. Особливу роль в теоретичних дослідженнях відіграють способи аналізу и синтезу. *Аналіз* – спосіб наукового дослідження, при якому явище (об’єкт), що досліджується розділюється на окремі елементи. *Синтез* – протилежний аналізу спосіб, який полягає у дослідженні явища (об’єкта) у цілому з урахуванням взаємодії окремих його елементів.

Основним методом, який широко використовується у прикладних дослідженнях, є *гіпотетичний метод*, який базується на розробці *гіпотези*, тобто наукового уявлення, який містить елементи новизни та оригінальності. Існує також т.з. *аксіоматичний метод*, оснований на очевидних положеннях (аксіомах), що приймаються без доведення. Проте, він більше розповсюджений в теоретичних науках (математика, математична логіка і т.п.). Основою ж прикладних досліджень є гіпотетичний метод, що містить у собі:

- вивчення фізичної сутності явища або об’єкта, що досліджується, за допомогою розглянутих вище методів: дедукція, індукція, аналіз, синтез;
- формулювання гіпотези і побудова фізичної моделі (модельовання) досліджуваного процесу (об’єкта); даний елемент є ключовим в методології гіпотетичного метода;

- selection of a mathematical method for the simulation (mathematization of the model) and comprehensive study of the model constructed; in the process, the so-called analytical methods are used; they enable to clear up the mathematical dependencies between the parameters of the model being investigated; the basic form of mathematical dependencies are various types of equations (more frequent case, it is sets of equations): algebraic, differential, integration and so forth;

- derivation of analytical expressions, their theoretical analysis and development of theoretical postulations.

Forth stage is *experimental study*. It is the most important constituent part of R-work, but it is also the most labor-intensive stage of R-work. Experimental study in general case require of high degree punctuality, attention, patience during a long time span. The main purpose of experimental study is to verify theoretical statements, i.e. confirmation of the working hypothesis, as well as more wide and detailed study of the R-work subject-matter. There are two varieties of experimental study, laboratory and industrial.

Laboratory study, i.e. ones performed in lab conditions, is executed with application of standard instrumentation and specific simulating installations, stands, equipment etc. Under condition of sufficiently full scientific substantiation of the experiment (mathematical design), lab study enables to derive good scientific findings at minimal expenses. However, such experiments do not always fully simulate the real conditions that necessitates performing an industrial experiment.

Industrial experimental study is aimed to investigate the process or object in real conditions with consideration of the exposure of random factors of the industrial medium. Such experiments are performed at industrial works where electrical equipment is operated.

The key element of experimental study is the so-called *methodology of an experiment*. It is developed for the purpose to minimize the amount of works and costs to perform experimental study. It represents the general structure or project of the experiment, i.e. the statement and sequence of executing the experimental study. The methodology of experiment usually includes the following basic stages: development of the experimental design diagram; choice of facilities to perform the experiment; performing the experiment and evaluation of the measurements executed; processing and analysis of the experimental findings. Let us consider these in more detail.

– вибір математичного метода дослідження моделі (математизація моделі) і її всебічне дослідження; при цьому широко використовуються т.з. *аналітичні методи*, які дозволяють встановити математичні залежності між параметрами досліджуваної моделі; основною формою математичних залежностей є різноманітні рівняння (частіше системи рівнянь): алгебраїчні, диференціальні, інтегральні і т. д.;

– отримання аналітичних виразів, їх теоретичний аналіз і розробка теоретичних положень.

4-й етап – експериментальні дослідження: є найбільш важливою складовою частиною НДР, це також й найбільш трудомісткий етап НДР. Експериментальні дослідження у загальному випадку потребують великої акуратності, уваги, терпіння упродовж тривалого періоду часу. Основною метою експериментальних досліджень є перевірка теоретичних положень (підтвердження робочої гіпотези), а також більш широке і глибоке вивчення теми НДР. Експериментальні дослідження поділяються на лабораторні та виробничі.

Лабораторні дослідження проводяться, як правило, з використанням типових приладів, спеціальних моделюючих установок, стендів, обладнання і т. д. При достатньо повному науковому обґрунтуванні експерименту (математичному плануванні) вони дозволяють отримати хорошу наукову інформацію з мінімальними затратами. Проте, такі експерименти не завжди повністю моделюють реальний хід процесу, що вивчається, тому виникає потреба у проведенні виробничого експерименту.

Виробничі дослідження мають за мету вивчити процес в реальних умовах з урахуванням дії випадкових факторів виробничого середовища. Такі експерименти проводять на підприємствах, які здійснюють експлуатацію електричних апаратів та іншого електрообладнання.

Ключовим елементом експериментальних досліджень є *методологія експерименту*, яка розробляється з метою мінімізації об'єму робіт і коштів, що витрачаються на проведення експериментальних досліджень. Вона являє собою загальну структуру (проект) експерименту, тобто постановку і послідовність виконання експериментальних досліджень. Методологія експерименту включає в себе наступні основні етапи: розробку плану-програми експерименту; вибір засобів для проведення експерименту; проведення експерименту і оцінка виконаних вимірювань; обробку та аналіз експериментальних даних. Розглянемо їх більш детально.

The *experimental design diagram* includes the name of the research topic, the working hypothesis, the experiment procedure, the list of necessary materials, instruments, installations, the list of experiment executors, the schedule of works, the estimate for carrying out the experiment, etc. The basis of the diagram is the experiment procedure. It is a system of techniques or methods for the most efficient implementation of an experimental study, and in the general case includes the purpose and main problems of the experiment; choice of variables (factors); justification of the means and the required number of measurements; description of the experiment procedure; substantiation of methods for processing and analyzing the experimental findings.

Definition of the main problems of the experiment is one of the most important stages of the experiment procedure. It is carried out by the way of analysis of available scientific information, hypotheses and theoretical developments allowing, in this or that degree, to judge about the expected behavior of the object (process) under study, and, consequently, to determine the tasks of the experiment.

The *choice of variables (factors)* consists in determining the main and secondary factors that affect the object (process) under study. At first, the calculated (theoretical) schemes of the process are analyzed. Basing upon this, all factors are classified and are listed in series according to decreasing importance for this experiment. The correct choice of primary and secondary factors plays an important role in the effectiveness of the experiment, since the experiment is reduced to finding the dependencies between these factors.

To identify immediately the role of the primary and secondary factors is frequently difficult; in such cases, a small preliminary searching trial should be performed. The main principle in determining the degree of importance of a variable is its role in the object (process) under study. It is determined, as a rule, by varying this variable with constant values of the others. If their number is sufficiently large, the principle of *multivariable analysis* is appropriate.

Substantiation of measuring instruments is the choice of instruments, equipment, machines, devices, etc. necessary for observations and measurements. The experimenter must be well acquainted with the measuring technique. There are catalogs for measuring instruments, according to which one or another instrument can be ordered. In the first place, of course, it should be used standard, mass-produced certified machines and devices.

План-програма експерименту містить найменування теми дослідження, робочу гіпотезу, методику експерименту, перелік необхідних матеріалів, приладів, установок, список виконавців експерименту, календарний план робіт, кошторис виконання експерименту та інших. Основу плану-програми становить *методика експерименту*. Вона являє собою систему прийомів або способів для послідовного найбільш ефективного здійснення експериментального дослідження і в загальному випадку містить у собі мету та основні завдання експерименту, вибір варійованих факторів, обґрунтування засобів та необхідної кількості вимірювань; опис проведення експерименту, обґрунтування способів обробки та аналізу результатів експерименту.

Визначення основних завдань експерименту є одним з найбільш важливих елементів методики експерименту. Він здійснюється на основі аналізу наявної наукової інформації, гіпотез та теоретичних розробок, яка дозволяє тією чи іншою мірою судити про очікувані закономірності поведінки досліджуваного об'єкта чи процесу, отже, і визначити основні завдання експерименту.

Вибір варійованих чинників – це встановлення основних і другорядних чинників, які впливають досліджуваний об'єкт (процес). Спочатку аналізують розрахункові (теоретичні) схеми процесу. На основі цього класифікують всі чинники і складають ряд у порядку їх зменшення за важливістю для даного експерименту. Правильний вибір основних та другорядних чинників відіграє важливу роль в ефективності експерименту, оскільки експеримент і зводиться до знаходження залежностей між цими чинниками.

В окремих випадках важко відразу виявити роль основних та другорядних чинників; у таких випадках необхідно виконати невеликий за обсягом попередній пошуковий дослід. Основним принципом встановлення ступеня важливості чинника є його роль у досліджуваному об'єкті (процесі). Вона визначається, зазвичай, шляхом варіювання цим чинником (змінною) при постійних значеннях інших. Якщо змінних величин досить багато, доцільним є *принцип багатфакторного аналізу*.

Обґрунтування засобів вимірювань – це вибір необхідних для спостережень та вимірювань приладів, обладнання, машин, апаратів та ін. Експериментатор має бути добре ознайомлений з вимірювальною технікою. Існують каталоги на засоби вимірювання, якими можна замовити ті чи інші засоби вимірювань. Звичайно, що в першу чергу використовують стандартні сертифіковані машини і прилади, що випускаються серійно.

In some cases, for experimental research of the object (process), there is a need to create unique devices, devices, installations, stands, machines. In such cases, the development and design of instruments and other means must be carefully substantiated by theoretical calculations and practical considerations in respect to the possibility of making such equipment. In creating new devices, it is advisable to use ready-made units of manufactured devices or refine the available measuring facilities.

It is very essential to establish the accuracy of measurements and errors in measuring process. Methods of measurements should be based on the laws of a special science known as *metrology* studying measuring technique and methods.

In measuring, repeated readings on instruments are usually not the same. The more random factors affect the object or process, the greater the deviation of individual measurements from the average value. In such cases, a number of repeated measurements should be performed. The number of measurements in given trial must provide a stable average value of the measurand that satisfies the given degree of accuracy. The solution of this problem is of great importance, since it provides the most objective results with minimal time and money.

An important section of the experimental methodology is the choice of methods for *processing and analyzing experimental data*. Data processing is reduced to the systematization of all figures, their classification and analysis. The experimental findings should be summarized in readable forms of records, namely, tables, graphs, formulas, nomograms, allowing you to quickly and accurately compare the findings.

Particular attention in the experiment procedure should be paid to mathematical methods for processing and analyzing experimental data, i.e. statement of empirical dependencies, approximation of relationships between variables, establishing criteria and confidence intervals, etc.

Modern methodology of the experiment, in addition to the represented elements, contains the so-called *theory of an experiment*. It enables to drastically enhance the accuracy and reduce the amount of experimental study. The main component of the theory of an experiment is mathematical *design of an experiment* or *experimental design*, that is, the use of mathematical statistics methods not only in processing and in analyzing the derived findings, but also in preparing and conducting experimental research (see subsection 1.2).

В окремих випадках виникає потреба у створенні унікальних приладів, апаратів, установок, стендів, машин. Розробка та конструювання таких засобів повинні бути ретельно обґрунтовані теоретичними розрахунками та практичними міркуваннями щодо можливості виготовлення такого обладнання. При створенні нових приладів, бажано використовувати готові вузли приладів, що випускаються, або реконструювати наявні вимірювальні засоби.

Дуже суттєвим у процесі вимірювань є встановлення точності вимірювань та похибок. Методи вимірів повинні базуватися на законах спеціальної науки – *метрології*, що вивчає засоби та методи вимірів.

При вимірах повторні відліки на приладах зазвичай не однакові. Чим більше випадкових факторів впливають на об'єкт або процес, тим більшими будуть відхилення окремих вимірювань від середнього значення. У таких випадках необхідно виконати декілька повторних вимірів. Кількість вимірів у даному досліді повинна забезпечити стійке середнє значення вимірюваної величини, що задовольняє заданий рівень точності. Вирішення цього завдання має велике значення, оскільки забезпечує отримання найбільш об'єктивних результатів при мінімальних витратах часу та коштів.

Важливим розділом методики експерименту є вибір *методів обробки та аналізу експериментальних даних*. Обробка даних зводиться до систематизації всіх цифр, їх класифікації та аналізу. Результати експериментів повинні бути зведені в легко читані форми запису – таблиці, графіки, формули, номограми, що дозволяють швидко і доброякісно зіставляти отримані результати. Особлива увага в методиці має бути приділена математичним методам обробки та аналізу дослідних даних – встановленню емпіричних залежностей, апроксимації зв'язків між варійованими характеристиками, встановленню критеріїв та довірчих інтервалів та ін.

Сучасна методологія експерименту, окрім наданих елементів, містить у собі математичну *теорію експерименту*, яка дозволяє суттєво підвищити точність та зменшити об'єм експериментальних досліджень. Її основним елементом є математичне *планування експерименту*, тобто використання методів математичної статистики не тільки в процесі обробки і аналізу отриманих даних, але й у процесі підготовки і проведення експериментальних досліджень (див. підрозділ 1.2).

Fifth stage consists in analysis and documenting of scientific researches. Primarily, at this stage, theoretical and experimental researches are generally analyzed and compared; the discrepancies are more attentively analyzed; theoretical models, researches and deductions are refined. In the case of necessity, additional experiments are performed. In such a way, the hypothesis is transformed into the theory and scientific and productive deductions are formulated. Finally, the report on the scientific research work is drawn up, as well as the lectures are composed, etc.

Sixth stage is implementation of the findings into production and evaluation of their economic efficiency.

Development work (D-works) is usually a logical extension of R-works; it includes the following stages. The first stage is *detail designing* including the following works: execution of calculations; development of drawings; making certain units, blocks and analyzing their operation; development and agreement of engineering forms and records; feasibility study of the project. The second stage is *contractor designing* that includes analysis and control of engineering forms and records, designing technological processes, including the development of process sheets and drawing up of the works organization design. The third stage is *making and development of the prototype* that includes: making of pieces, units and assemblage of a prototype; checking and adjustment of the prototype; bench and production testing; analysis of the prototype units as for operability; replacement of certain units and execution of retests. The fourth stage is *certification tests*.

1.2 Basic Principles of Designing an Experiment

The *designing an experiment* or *experimental design* is one of the sections of mathematical statistics that appeared relatively recently (about 50 years ago) and has now become a new independent scientific discipline. The subject of this discipline is an experiment in its broadest sense, namely, a totality of operations (actions) carried out on the object to be researched for the purpose to derive information about its qualities.

The main goal of the experimental design is to determine the conditions and rules for conducting the experiment, which allow derive the most extensive, reliable and truth information about the object under study with the lowest costs (labor, materials, finances).

5-й етап – аналіз та оформлення наукових досліджень. На цьому етапі, по-перше, виконується загальний аналіз теоретичних і експериментальних досліджень, їх співставлення, аналіз розбіжностей, уточнення теоретичних моделей, досліджень і висновків. По-друге, в разі необхідності проводяться додаткові експерименти. Таким чином, гіпотеза перетворюється в теорію, відбувається та формулювання наукових та виробничих висновків. На завершення, виконується складання та рецензування звіту з НДР, складання докладів і т. п.

6-й етап: впровадження результатів НДР у виробництво і оцінка їх економічної ефективності.

Дослідно-конструкторська робота є, як правило, логічним продовженням НДР; вона містить у собі наступні етапи. 1-й етап – *технічне проектування*: розробка варіантів технічного проекту; розрахунки; розробка креслень; виготовлення окремих вузлів, блоків і аналіз їх роботи; розробка та узгодження технічного проекту; техніко-економічне обґрунтування проекту. 2-й етап – *робоче проектування*: розробка з усіма деталями робочого проекту. 3-й етап – *виготовлення та доробка дослідного зразка*: аналіз і контроль технічної документації; проектування технологічних процесів, розробка карт, складання проекту організації робіт; виготовлення деталей, блоків і вузлів дослідного зразка та його складання; випробовування, регулювання зразка; стендові та виробничі випробування; аналіз роботи вузлів зразка; заміна окремих вузлів та проведення повторних випробувань. 4-й етап – *сертифікаційні випробування*.

1.2 Основні принципи планування експерименту

Планування експерименту – це один з розділів математичної статистики, який з'явився відносно недавно (біля 50 років тому) і зараз став новою самостійною науковою дисципліною. Предметом даної дисципліни є *експеримент* у самому широкому його розумінні, а саме: сукупність операцій (дій), що здійснюються над об'єктом дослідження з метою здобуття інформації про його якості.

Основною метою планування експерименту є визначення умов та правил проведення експерименту, які дозволяють з найменшими затратами (труда, матеріалів, фінансів) здобути найбільш широку, надійну та достовірну інформацію про досліджуваний об'єкт.

It is equally important to represent the derived information in a compact and user-friendly form with an evaluation of its accuracy. The experimental design is a universal method aimed to solve the practical problems related to research a wide variety of objects, including the so-called "diffuse" objects. In such objects, numerous phenomena of a different nature occur together, in a close communication, where it is very difficult to distinguish their effect and influence on the investigated qualities of the object.

Experimental design methods enables us to organize the derivation of statistical material so that meets certain requirements and provides the possibility of its appropriate mathematical and statistical processing. At the same time, one or another processing method is pre-selected; the experiment is directionally organized according to a specially developed diagram (plan); the results of the experiment are subjected to statistical processing. On this basis, a mathematical model describing the object under study with a given accuracy is constructed. It should be noted that the experiment diagram itself could be optimized according to certain indicators or criteria: for example, the minimum number of necessary trials (measurements), etc.

The application experience of experimental design methods in various fields of science shows its sufficiently high efficiency, which is manifested in the following. Firstly, the volume of works on conducting the experiment is reduced and, secondly, the reliability of their results is significantly increased.

The main problems solved with the help of experimental design methods are as follows. The first is to find out the mechanism of the process under study with one or another accuracy, i.e. create its mathematical model basing upon the results of statistical measurements and observations; in this case, so-called *factorial experiments* are performed. The second is to determine the conditions for the optimum of the function of several variables; in this case, methods of designing the so-called *extreme experiments* (method of steepest descent, simplex method, etc.) are used.

When the researcher starts experimental researches, he usually does not have comprehensive information about the research object or the mechanism of the process under study. He has only some a priori information as some assumptions about the possible behavior of the researched object or process under the influence of certain factors.

Не менш важливим при цьому є також надати здобуту інформацію в компактній та зручній для використання формі з кількісною оцінкою її точності. Планування експерименту це універсальний метод, направлений на вирішення практичних задач дослідження самих різноманітних об'єктів, у тому числі так званих «погано організованих» об'єктів. «Погано організованими» або «дифузними» називають такі об'єкти, в яких численні різні за своєю природою явища відбуваються разом, у тісному зв'язку, де дуже складно розмежувати їх дію та вплив на досліджувані якості об'єкта.

Методи планування експерименту дозволяють певним чином організувати набуття статистичного матеріалу, який відповідає певним вимогам, що забезпечує можливість його відповідної математико-статистичної обробки. При цьому попередньо обирається той чи інший метод обробки; експеримент направлено організується за спеціально розробленою програмою (планом); результати експерименту піддаються статистичній обробці, на основі якої будується *математична модель* досліджуваного об'єкту, яка описує його з заданою точністю. Слід зазначити, що сам план проведення експерименту може бути оптимізований за тими чи іншими показниками або критеріями: наприклад, мінімум числа необхідних дослідів (вимірювань) і т. п.

Отже, практика використання методів планування експерименту у самих різних галузях науки показує його достатньо високу ефективність, яка виявляється у тому, що, по-перше, скорочується об'єм робіт з проведення експерименту і, по-друге, значно підвищується достовірність їх результатів;

Основними задачами, що вирішуються за допомогою методів планування експерименту, є такі:

1. З'ясувати механізм досліджуваного процесу з тою чи іншою точністю, тобто створити його математичну модель за результатами статистичних вимірювань і спостережень. У цьому випадку ставляться так звані *факторні експерименти*.

2. Визначити умови оптимуму деякої функції від декількох змінних. У цьому випадку використовуються методи планування так званих *екстремальних експериментів* (методи крутого сходження, симплекс-метод і т. п.).

Приступаючи до експериментальних досліджень, дослідник, як правило, не має вичерпних знань про досліджуваний об'єкт або механізм досліджуваного процесу; у наявності лише деяка апріорна інформація у вигляді деяких припущень про можливу поведінку досліджуваного об'єкту або процесу під впливом певних чинників.

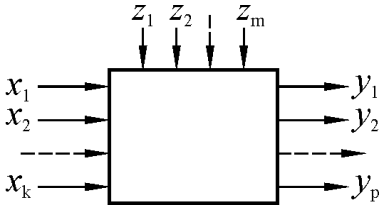


Figure 1.1 – Schematic representation of a “black box”

Under such conditions, the so-called *cybernetic approach* is used. This approach is based on the idea to consider the object (process) under study as a “black box”, which is influenced by certain factors, as schematically shown in Figure 1.1. This factors (input parameters) can be controllable x_1, x_2, \dots, x_k or

uncontrollable: z_1, z_2, \dots, z_m (the so-called "disturbances"). The operation of the object can be characterized by a number of output parameters y_1, y_2, \dots, y_p . Frequently, only one parameter is investigated, which is the result of the experiment called the *response* or *goal function*. The relationship between the response and the input parameters (factors) is called the *response function*. It is, in the general case, a function of many variables: $Y = F(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n)$. We have the only general imagine about this function, but we want to know perhaps more. By setting a certain set of variables X_i , as a result of the experiment we can derive the corresponding values of Y . Fixing various sets, we can get as much information about the function under study as we like. The challenge consists first in correct use of this information.

If we investigate the influence of only one independent variable on Y , then the problem is quite simple. In this case, by specifying several values of X , we can get the dependence $Y = F(X)$, and the goal will be achieved. If we are not sure that the experiments are well reproduced (the findings are not single-valued), we should repeat the experiment several times at the same X values and construct the dependence with consideration of the spread of Y values (using the methods of statistical processing of experimental data).

If the number of independent variables consists two, then the problem does not become much more complicated. In this case, the family of dependencies $Y = F(X_1)$ at $X_2 = \text{const}$ is measured. If necessary, analytical expressions are selected that approximate the obtained dependencies. The task becomes much more complicated if the number of variables is 3, 4 or even more. In this case, in the same manner, a number of families of dependencies can be derived, but the information obtained in this form about the function under study will be practically useless, since it is very difficult to analyze.

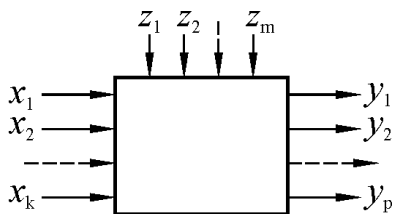


Рисунок 1.1 – Схема «чорного ящика»

декількома вихідними параметрами y_1, y_2, \dots, y_p . Досліджуваним є, як правило, один параметр, який є результатом експерименту і називається *відкликом* або *функцією цілі*. Залежність між відкликом та входними параметрами (факторами) називається *функцією відклику* і являє собою у загальному випадку функцію багатьох змінних: $Y = F(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n)$, про яку, як зазначалось, ми маємо лише загальні (а підчас інтуїтивні) уявлення, але бажаємо узнати, ймовірно, більше. Якщо задати певну сукупність змінних X_i , то в результаті експерименту ми можемо здобути відповідні значення Y , а фіксуючі різні сукупності – як завгодно багато інформації про досліджувану функцію. Задача, по перш за все, полягає у тому, щоб правильно її використовувати.

Якщо досліджується вплив на Y лише однієї незалежної змінної, то задача досить проста: у цьому випадку задаючись декількома значеннями X можна здобути залежність $Y = F(X)$, і мета буде досягнута. Якщо у нас немає впевненості, що досліди добре відтворюються (відсутня однозначність), слід повторити їх декілька разів при одних і тих же значеннях X и побудувати залежність з урахуванням отриманого розбігу значень Y (використовуюючи методи статистичної обробки експериментальних даних).

Якщо незалежних змінних дві, то задача суттєво не ускладнюється: у цьому випадку знімають сімейство залежностей $Y = F(X_1)$ при $X_2 = \text{const}$. При необхідності підбирають аналітичні вирази, що апроксимують здобуті залежності. Задача суттєво ускладнюється, якщо змінних 3, 4 або ще більше. У такому випадку таким же чином можна здобути ряд сімейств залежностей, проте здобута у такому вигляді інформація про досліджувану функцію буде практично безкорисною, оскільки дуже важко піддається аналізу.

In some cases, the type of analytical expression for approximation the function under study can be determined using the available information. In this case, the main problem is to find the unknown constants in the accepted expression. However, the type of the approximating function usually cannot be determined. In such cases, the expansion of the function under study in some power series is considered, for example as follows:

$$Y = B_0 + \sum_{i=1}^k B_i X_i + \sum_{i < j} B_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k B_{ii} X_i^2 + \dots \quad (1.1)$$

Of course, in practical applications the number of terms in this expansion is a finite one. Such a representation of the research function, known as the *regression equation* (or *model* of the process under study), is possible if the function is continuous and sufficiently “smooth”.

Thus, the main problems facing the researcher are as follows:

- to determine a certain number of Y values at the corresponding number of combinations of independent variables $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n$, considering that Y can be different at the same combination of variables X_i under the influence of any random circumstances;

- to find the coefficients of the regression equation B_0, B_1 , etc. using the derived information;

- to check how the constructed regression equation is consistent with the experimental data; if such a check gives a positive result, so we can assume that the goal has been achieved.

In solving these problems, a number of questions arise; their essence is as follows:

1. What is known about the research function? What combinations of factors and how many such combinations should be taken to determine the value of the response Y ?

2. How to find the coefficients B_0, B_1 , etc., so that the regression equation best corresponds to the research function?

3. How to evaluate the accuracy of the derived representation of the function?

У деяких випадках, на основі наявної інформації можна визначити вигляд аналітичного виразу для апроксимації досліджуваної функції. У цьому випадку задача зводиться до знаходження невідомих постійних, що входять у прийнятий вираз. Проте, частіше за все вид апроксимуючої функції визначити не вдається. В таких випадках розглядається розкладання досліджуваної функції у степеневий ряд, наприклад наступного вигляду:

$$Y = B_0 + \sum_{i=1}^k B_i X_i + \sum_{i < j} B_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k B_{ii} X_i^2 + \dots \quad (1.1)$$

На практиці, звісно, обмежуються кінцевим числом членів цього розкладання. Таке представлення досліджуваної функції, яке називається *рівнянням регресії* (або *моделлю досліджуваного процесу*), є можливим, якщо досліджувана функція є безперервною та достатньо «гладкою».

Таким чином, основні задачі, що стоїть перед дослідником, полягають у наступному:

- задаючи певну кількість сполучень незалежних змінних $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n$ визначити відповідне число значень Y ; при цьому необхідно урахувати, що під впливом якихось випадкових обставин для одних і тих же сполучень змінних X_i величини Y можуть бути різними;
- використовуючи здобуту інформацію, знайти коефіцієнти рівняння регресії B_0, B_1 і т. д.;
- перевірити наскільки здобуте рівняння регресії узгоджується з даними експерименту; якщо така перевірка дає позитивний результат, то можна вважати, що мета досягнута.

В процесі рішення цих задач виникає ряд питань, їх сутність полягає у наступному:

1. Що відомо про досліджувану функцію? Які сполучення факторів і скільки таких сполучень треба взяти для визначення величини відклику Y ?
2. Як знайти коефіцієнти B_0, B_1 і т. д., щоб рівняння регресії найкращим чином відповідало досліджуваній функції?
3. Як оцінити точність здобутого представлення функції?

The questions stated are the subject of experimental design. The key task in this case is to find the regression equation, which is carried out using the step-by-step search method. At first, a linear model is accepted; if it was found as unsatisfactory, then the power series is increased to 2, 3, etc. order until a regression equation would become so that adequately describes the research object.

Solving the problem according to experimental design procedure is started from analyzing the factors, i.e. variables $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n$ whose effect on the goal function is studied. One of the main properties of the factors consists in that they can be varied by the researcher according to his own discretion. This property is one of the main ideas of the experimental design. A good mathematical description (regression equation) of the research process can be derived only in the case, when in researching we are able to set combinations of factors X_i in a certain way. In this case, we deal with the so-called *active experiment*. However, in some cases, the researcher cannot control the factors; he can only record (control) their changes caused by objective reasons, but not desire of the researcher. In this case, the so-called *passive experiment* is conducted (in this case, it is not considered).

When assigning factors, it is very important that they are independent (uncorrelated) from other factors. This fact must be ascertained before the task is started to perform. An important requirement for factors is their *importance*, i.e. the factor must be significant in the research process. When the factors are analyzed, insignificant ones should be preliminarily eliminated. Naturally, this requires preliminary information, certain knowledge about the object or process under study.

The correct choice of the ranges of change (variation levels) of factors is equally important, since it gives the domain of the research function Y . These ranges can be *wide* (limited only by physical considerations) if factorial experiments are performed, or, on the contrary, *narrow*, if extreme experiments are performed. In both cases, for each of X_i factors, the boundary values $X_{i \min}$ and $X_{i \max}$ are known.

Поставлені питання і є предметом планування експерименту. Ключовою задачею у даному випадку є знаходження рівняння регресії, яке здійснюється методом покрокового пошуку: спочатку приймають лінійну модель; якщо вона виявляється незадовільною, то підвищують степінь до 2, 3 і т. д. до тих пір, поки не буде здобуте рівняння регресії, яке адекватно описує досліджуваний об'єкт.

Рішення задачі з планування експерименту починають з **аналізу факторів**, тобто змінних $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n$, вплив яких на функцію цілі вивчається. Одна з основних властивостей факторів полягає у тому, що дослідник може змінювати їх за своїм розсудом. У цьому полягає одна з основних ідей планування експерименту: добрий математичний опис (рівняння регресії) досліджуваного процесу може бути здобутий тільки у тому випадку, якщо є можливість при роботі з досліджуваним об'єктом, певним чином задавати сполучення факторів X_i . У такому випадку ми маємо справу з т. з. *активним експериментом*. Однак, можливі ситуації, у яких дослідник не може керувати факторами, а може лише реєструвати (контролювати) їх зміну, яка відбувається з об'єктивних причин (не за волею дослідника). У такому випадку проводиться т. з. *пасивний експеримент* (у даному випадку він не розглядається).

Дуже важливим при призначенні факторів є їх незалежність (*некорельованість*) від інших факторів. Це повинно бути встановлено до початку вирішення задачі. Важливою вимогою до факторів є *значущість*, тобто фактор повинен бути суттєвим у досліджуваному процесі. В процесі їх аналізу слід попередньо відсіяти незначущі фактори. Звісно, що це потребує попередньої інформації, певних знань про досліджуваний об'єкт або процес.

Не менш важливим є правильний вибір діапазону зміни (рівнів варіювання) факторів, оскільки він задає область визначення досліджуваної функції Y . Ці діапазони можуть бути *широкими* (обмеженими лише фізичними міркуваннями), якщо ставляться факторні експерименти, або навпаки *вузькими*, якщо ставляться екстремальні експерименти. І в тому і в іншому випадках для кожного з факторів X_i відомі граничні значення $X_{i\text{мін}}$ і $X_{i\text{макс}}$.

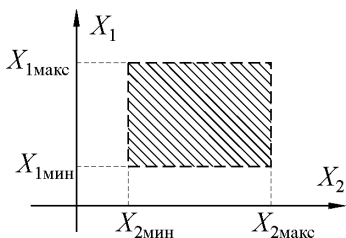


Figure 1.2 – Image of the factorial space

If for each factor we will have a coordinate axis, then the space obtained in such a way is usually called the *factorial space*. Specifying in such manner the ranges of factors, we thereby determine *the domain of the function* in the factorial space. For the case of two factors, the factorial space has the form of a rectangle as shown in Figure 1.2. In the same manner, 3-D factorial space can be depicted, and such a representation can be

extended to an n-D space (naturally, it is impossible to depict it).

It should be noted another important condition that must be necessarily observed in conducting an experiment, the case in point is the *compatibility of factors*. Incompatibility means that a certain combination of factors lead to destruction of normal course of the process under study. In other words, any combination of factors within the factorial space must be realizable and not lead to absurdity. In this regard, there is a classic example from the field of chemistry, where the factors are frequently the components of some useful product. When some combination of these components in the accepted ranges of change leads to an explosion, then in this case the compatibility condition is not fulfilled. In electricity, the typical incompatibility condition is a short circuit followed by fire or electrodynamic destruction of electrical equipment, insulation breakdown, etc.

The next stage of the experimental design, carried out in preparing the experiment, is coding the factors. It should be noted that the selected factors $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n$ are generally dimensional quantities; moreover, their dimensions can be very different; the quantities expressed by the magnitudes of the factors can have highly different orders. This can lead to great inconvenience in solving the problem to determine the coefficients of the regression equation. In this regard, (there are also other reasons), the true (natural) magnitudes of the factors are converted into dimensionless quantities, this process is known as *factorial space transformation*. To do this, it is first necessary to specify the upper and lower limits of the change for each factor during the experiment: $X_{i \text{ min}}$ and $X_{i \text{ max}}$ (see the previous stage). Coding the factors (variables) consists in transfer of the coordinate origin of the factor space to a point with coordinates: $X_{1cp}, X_{2cp}, \dots, X_{icp}, \dots, X_{ncp}$, where

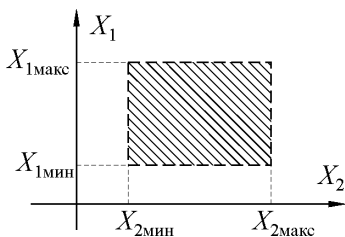


Рисунок 1.2 – Зображення факторного простору

Якщо встановити для кожного фактора координатну вісь, то отриманий таким чином простір називають *факторним простором*. Таким чином, встановлюючи діапазони зміни факторів, ми тим самим задаємо *область визначення функції* у факторному просторі. Для випадку двох факторів можна показати факторний простір у вигляді прямокутника, рис. 1.2. Можна зобразити аналогічно тривимірний простір і розповсюдити таке уявлення на n -вимірний простір (зобразити його, звісно, неможливо).

Слід відзначити ще одну важливу умову, яку повинно в обов'язковому порядку дотримуватись в процесі постановки експерименту – це *сумісність факторів*. Несумісність означає, що певне сполучення факторів руйнує нормальний перебіг досліджуваного процесу. Іншими словами, будь-яке сполучення факторів у межах факторного простору повинно бути таким, що реалізується і не приводить до абсурду. З цього приводу можна навести класичний приклад з області хімії, коли факторами можуть бути компоненти якогось корисного продукту, властивості якого вивчаються; якщо існує деяке їх сполучення у прийнятих діапазонах зміни, при яких відбувається вибух, то у такому випадку умова сумісності не виконується. В електриці умовою несумісності може бути коротке замикання і, як наслідок, загоряння або електродинамічне руйнування електрообладнання; пробій ізоляції і т. д.

Наступним етапом планування експерименту, що здійснюється в процесі підготовки до проведення експерименту, є **кодування факторів**. Слід зазначити, що обрані фактори $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n$ у загальному випадку є розмірними величинами; причому, їх розмірності можуть бути самими різноманітними; числа, що відображають величини факторів можуть мати зовсім різні порядки. Це може привести до серйозних незручностей при вирішенні задачі з знаходження коефіцієнтів рівняння регресії. У зв'язку з цим (є й інші причини), істинні (натуральні) значення факторів перетворюють у безрозмірні величини, тобто здійснюють *перетворення факторного простору*. Для цього необхідно, поперед за все, задати верхні та нижні межі зміни кожного фактора в процесі проведення експерименту: $X_{i\text{мін}}$ і $X_{i\text{макс}}$. Кодування зводиться до переносу початку координат факторного простору в точку з координатами: $X_{1\text{ср}}, X_{2\text{ср}}, \dots, X_{i\text{ср}}, \dots, X_{n\text{ср}}$, де

$$X_{i\text{cp}} = \frac{X_{i\text{мин}} + X_{i\text{макс}}}{2}. \quad (1.2)$$

In the process, all factors are specified in the range from -1 to $+1$, i.e. $X_{i\text{мин}}$ corresponds to the dimensionless value -1 , $X_{i\text{макс}}$ to $+1$, and $X_{i\text{ав}}$ to 0 , respectively. Thus, the coded magnitudes of the factors are related to their natural values by the following relationships:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i\text{cp}}}{X_{i\text{cp}} - X_{i\text{мин}}} = \frac{X_i - X_{i\text{cp}}}{X_{i\text{макс}} - X_{i\text{cp}}} = \frac{2X_i - X_{i\text{макс}} - X_{i\text{мин}}}{X_{i\text{макс}} - X_{i\text{мин}}}. \quad (1.3)$$

Thus, the regression equation with consideration of the coded magnitudes of the factors becomes as follows:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (1.4)$$

where coefficients b_0 , b_i , b_{ij} , b_{ii} differ from the coefficients of the initial equation (1.1)

The next stage of the experimental design, also carried out before the actual conduct of the experiment, is the compilation of the so-called *design matrix* of the experiment. In other words, it should be determined how many factor values and in what combinations they should be specified. In this regard, the so-called *full factorial experiment* and *fractional factorial experiment* (so-called *fractional replicates*) are distinguished. A full factorial experiment is implemented at all possible combinations of factor variation levels. If we have n factors, each of which is specified at q levels, then to carry out a full factorial experiment, q^n trials must be performed. The most extensively used experiments are those in which the factors are varied at two levels: $+1$ and -1 known as experiments of the type 2^n . The experiments with variation at three levels: $+1$; 0 and -1 , i.e. experiments of the type 3^n are less popular, since the required number of trials sharply increases with the increase in the number of levels.

Construction of a design matrix of an experiment is usually carried out as follows. For x_1 , the levels alternate in each trial; for x_2 – after two trials; for x_3 – through four ones, etc. For example, if we have three factors, then the design matrix has the form shown in table 1.1. It is called the first order orthogonal design.

$$X_{i\text{ср}} = \frac{X_{i\text{мин}} + X_{i\text{макс}}}{2}. \quad (1.2)$$

При цьому всі фактори надаються у межах від -1 до $+1$, тобто $X_{i\text{мин}}$ відповідає безрозмірній величині -1 , $X_{i\text{макс}}$ $+1$, а $X_{i\text{ср}}$ 0 . Отже, кодовані значення факторів зв'язані з натуральними їх значеннями наступними співвідношеннями:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i\text{ср}}}{X_{i\text{ср}} - X_{i\text{мин}}} = \frac{X_i - X_{i\text{ср}}}{X_{i\text{макс}} - X_{i\text{ср}}} = \frac{2X_i - X_{i\text{макс}} - X_{i\text{мин}}}{X_{i\text{макс}} - X_{i\text{мин}}}. \quad (1.3)$$

Таким чином, рівняння регресії з використанням кодованих значень факторів набуває наступного вигляду:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (1.4)$$

де коефіцієнти b_0 , b_i , b_{ij} , b_{ii} відрізняються від коефіцієнтів початкового рівняння регресії (1.1).

Наступним етапом планування експерименту, який здійснюється перед безпосереднім проведенням експерименту є **складання** т.з. **плану-матриці експерименту**. Іншими словами ми повинні визначити, скільки значень факторів і в яких сполученнях їх слід задавати. В цьому відношенні розрізняють т.з. *повний факторний експеримент* і *дробовий факторний експеримент* (т.з. *дробові репліки*). Повний факторний експеримент реалізується при всіх можливих сполученнях рівнів варіювання факторів: якщо ми маємо n факторів, кожен з яких задається на q рівнях, то для здійснення повного факторного експерименту необхідно поставити q^n спроб. Найбільш широке розповсюдження набули експерименти, в яких фактори варіюють на двох рівнях: $+1$ та -1 : експерименти типу 2^n ; менш популярними є експерименти з варіюванням на трьох рівнях: $+1$; 0 і -1 , тобто експерименти типу 3^n , оскільки з ростом числа рівнів різко зростає потрібне число спроб.

Складання плану-матриці експерименту за звичаєм здійснюється наступним чином: для x_1 рівні чергуються у кожній спробі; для x_2 – через дві спроби; для x_3 – через чотири і т. д. Наприклад, якщо ми маємо три фактора, то план-матриця має вигляд, наданий у табл. 1.1. Його називають ортогональним планом 1-го порядку.

Table 1.1 – Design matrix of the experiment

Trial number	x_1	x_2	x_3
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1

The next stage in the experimental design is the so-called *randomization of trials*, i.e. trials in time should be conducted in a random order. This is necessary in order to introduce an element of randomness of the influence of "disturbances" (uncontrollable factors) on the process under

study and, accordingly, the reasonable use of the mathematical statistics procedure. Randomization of trials is carried out, as a rule, using a random number generator or in some other way (extracting numbers from an urn, etc.).

After performing preparatory operations (coding factors, randomization of trials), the experiment is executed in accordance with the developed design. It is the most important and most labor-input stage. Vital importance in conducting experiments is the absence of subjective influence on the measurement results. In other words, it is necessary to record accurately and conscientiously all the results with no exceptions, not allowing selectivity. It should be noted that young scientists sometimes strive to obtain the required result (confirming the hypothesis) and choose only those experimental data that good comply with theoretical assumptions. In such cases, very valuable data about the process under study can be lost, while they are restored with great losses.

In conducting experiments, it is mandatory to keep a log in which all the results obtained without exception are entered, even at the presence of essentially different results. In such cases, it should be recorded also the circumstances under which they were obtained. This enables us to ascertain their cause, whether this corresponds to the real course of the process or this is a gross mistake. In conducting experiments, it necessary to monitor the state of the measuring devices and elements, first and foremost, the correctness of their readings, as well as their reliable operation. For this purpose, the working verification of measuring instruments is systematically carried out. If it has established that the measuring instruments do not provide the required accuracy, then the experiments should be suspended, and these instruments should be transferred to state validation.

Таблиця 1.1 – План-матриця експерименту

№ досліджу	x_1	x_2	x_3
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1

Наступним етапом планування експерименту є так звана **рандомізація спроб**, тобто встановлення випадкового порядку постановки спроб у часі. Це необхідно для того, щоб внести елемент випадковості впливу «збурень» (некерованих факторів) на досліджуваний процес і відповідно обгру-

нтованого використання апарата математичної статистики. Рандомізація спроб здійснюється, як правило, за допомогою *таблиці випадкових чисел* або якимось іншим способом (витягування номерів з урни і т. п.).

Після виконання підготовчих операцій (кодування факторів, рандомізація спроб) **реалізується експеримент** у відповідності з розробленим планом. Його проведення є важливішим та найбільш трудомістким етапом. Немаловажне значення в процесі проведення експериментів є відсутність суб'єктивного впливу на результати вимірювань. Іншими словами, необхідно точно й сумлінно фіксувати абсолютно всі результати, не допускаючи вибіркості. Слід зазначити, що іноді молоді наукові робітники намагаючись здобути потрібного результату (який підтверджує гіпотезу), обирають тільки ті експериментальні дані, які добре узгоджуються з теоретичними уявленнями. В таких випадках можуть бути втрачені дуже цінні дані про досліджуваний процес, які відновлюються з великими втратами.

В процесі проведення експериментів в обов'язковому порядку ведеться журнал, в який заносять всі без виключення здобуті результати, навіть при наявності даних, що різко відрізняються. В таких випадках слід зафіксувати також і обставини, при яких вони були здобуті. Це може дозволити встановити їх причину: чи то це відповідає реальному ходу процесу, чи то це грубий промах. В процесі проведення експериментів необхідно контролювати стан вимірювальних пристроїв та елементів. По-перше, правильність показань засобів вимірювань. Для цього систематично здійснюється їх робоча перевірка; якщо вона встановила, що вимірювальні прилади не забезпечують потрібної точності, то експерименти слід призупинити, а відповідні прилади передати на держперевірку. По-друге, надійність роботи вимірювальних пристроїв.

Conducting the experiments, at a certain combination of factors, results in numerical values of the goal function are obtained. To assess the reproducibility of the process and carry out statistical evaluations, *parallel trials* are provided for each combination of factor levels.

The final part of the process of experimental design is the analysis of the results of the experiment, which is the basis for the conclusion confirming the hypothesis of the scientific study. However, first, the findings obtained should be checked in respect to *reproducibility of the trials*. With the same number of parallel trials at each combination of factor levels, the reproducibility of the process under study is checked by the so-called Cochran's criterion, calculated in accordance with the following expression:

$$G = \frac{s_{u_{\text{max}}}^2}{\sum_{u=1}^n s_u^2} \quad (1.5)$$

where s_u is the variance characterizing the spread in the trial results for the u -th combination of factor levels, determined as follows:

$$s_u^2 = \frac{\sum_{p=1}^m (y_{up} - \bar{y}_u)^2}{m-1}, \quad (1.6)$$

where $p=1,2,\dots,m$ is the number of parallel trials; $s_{u_{\text{max}}}$ is the most among the variances in the lines of the design.

The process is considered as reproducible, if the following condition is fulfilled:

$$G \leq G(0,05; f_n; f_u), \quad (1.7)$$

where $G(0,05; f_n; f_u)$ is the reference value of Cochran's criterion at 5% level of the significance (or 95% confidence level); $f_n = n$ is the number of independent assesses of the variance; $f_u = m-1$ is the number of degrees of freedom of each assess.

If the condition of reproducibility of the process under study is fulfilled, then the coefficients of the regression equation can be determined. The main task at this stage of design of experiment is to derive such magnitudes of the coefficients that the response surface, obtained basing upon the regression equation, would be as close as possible to the experimental one.

В результаті проведення експериментів при певному сполученні факторів отримуємо чисельні значення функції цілі. Для оцінки відтворюваності процесу і проведення статистичних оцінок передбачаються *паралельні спроби* при кожному сполученні рівнів факторів.

Завершальною частиною процесу планування експерименту є аналіз результатів експерименту, на основі якого роблять висновок про підтвердження гіпотези наукового дослідження. Проте, у першу чергу на основі здобутих результатів здійснюється **перевірка відтворюваності спроб**. При однаковому числі паралельних спроб на кожному сполученні рівнів факторів відтворюваність досліджуваного процесу перевіряється по т.з. *критерію Кохрена*, який обчислюється у відповідності до наступного виразу:

$$G = \frac{s_{u \text{ макс}}^2}{\sum_{u=1}^n s_u^2} \quad (1.5)$$

де s_u – дисперсія, яка характеризує розсіяння результатів спроб на u -му сполученні рівнів факторів і визначається наступним чином:

$$s_u^2 = \frac{\sum_{p=1}^m (y_{up} - \bar{y}_u)^2}{m-1}, \quad (1.6)$$

де $p = 1, 2, \dots, m$ – число паралельних спроб; $s_{u \text{ макс}}$ – найбільша з дисперсій в строчках плану.

Процес визнається відтворюваним, якщо виконується наступна умова:

$$G \leq G(0,05; f_n; f_u), \quad (1.7)$$

де $G(0,05; f_n; f_u)$ – табличне значення критерію Кохрена при 5 % рівні значущості (або 95 % довірчій ймовірності); $f_n = n$ – число незалежних оцінок дисперсії; $f_u = m - 1$ – число ступенів вільності кожної оцінки.

Якщо умова відтворюваності досліджуваного процесу виконується, то здійснюється **визначення коефіцієнтів рівняння регресії**. Основною задачею на даному етапі планування експерименту є здобути такі значення коефіцієнтів, при яких поверхня відклику, здобута на основі рівняння регресії, проходила якомога ближче до експериментальної.

In such cases, the so-called *method of least squares* is the most extensively used. It consists in that the sum of the squared deviations between the known values of the function based on the experimental findings, and the function based on the accepted regression equation would be minimal:

$$\sum_{u=1}^n (y_u - \hat{y}_u)^2 \Rightarrow \min, \quad (1.8)$$

where n is the number of experimental points according to which the approximating surface is constructed; u is the number of the experimental point; y_u, \hat{y}_u are the values obtained as a result of the experiment and based on the regression equation, respectively.

The partial derivatives of this expression with respect to the corresponding coefficients of the regression equations, give a system of equations, which can be solved in respect to the coefficients. It should be noted that, as a first approximation, the so-called *linear model* (see above). In this case, the definition of coefficients $b_0; b_i$ та b_{ij} is limited according to the following expressions:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^n \bar{y}_u}{n}; b_i = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} \bar{y}_u}{n}; b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} x_{ju} \bar{y}_u}{n} \quad (1.9)$$

The next step in the process of designing an experiment is to verify the *linear model adequacy*. In this case, it should be established the acceptability of this approximation, i.e. the degree of correspondence of the derived regression equation to the process under study. Such a check is carried out using the so-called *Fisher's criterion*. The adequacy is substantiated if the following condition is fulfilled:

$$F = \frac{s_{ад}^2}{s_y^2} \leq F(0,05; f_{ад}; f_y), \quad (1.10)$$

where $F(0,05; f_{ад}; f_y)$ is the reference value of the Fisher's criterion with accepted 0.95 confidence level; $f_{ад} = n - k - 1$ is the number of degrees of freedom of the adequacy variance; f_y is the number of degrees of freedom of the reproducibility variance (in this case $f_y = n$); $s_{ад}$ is the adequacy variance; its value squared is calculated according to the following expression:

В таких випадках найбільш широко використовується т.з. *метод найменших квадратів*, в якому в якості критерію наближення (близькості) двох цих функцій використовується вимога, щоб сума квадратів відхилень між відомими значеннями досліджуваної функції, здобутої в процесі експерименту і на основі прийнятого рівняння регресії, повинна бути мінімальною:

$$\sum_{u=1}^n (y_u - \hat{y}_u)^2 \Rightarrow \min, \quad (1.8)$$

де n – число експериментальних точок, по яким проводиться апроксимуюча поверхня; u – номер експериментальної точки; y_u, \hat{y}_u – значення, здобуті в результаті експерименту та на основі рівняння регресії, відповідно.

На основі часткових похідних даного виразу за відповідними коефіцієнтами рівняння регресії отримують систему рівнянь, вирішення якої дає значення коефіцієнтів. Слід відзначити, що у першому наближенні приймають т.з. *лінійну модель* (див. вище). В такому випадку обмежуються визначенням коефіцієнтів $b_0; b_i$ та b_{ij} за наступними виразами:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^n \bar{y}_u}{n}; b_i = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} \bar{y}_u}{n}; b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} x_{ju} \bar{y}_u}{n} \quad (1.9)$$

Наступним етапом процесу планування експерименту є **перевірка адекватності лінійної моделі**. У даному випадку необхідно встановити прийнятність даної апроксимації, тобто ступінь відповідності здобутого рівняння регресії досліджуваному процесу. Така перевірка здійснюється за допомогою т.з. *критерію Фішера*: адекватність обґрунтована, якщо виконується умова:

$$F = \frac{s_{ад}^2}{s_y^2} \leq F(0,05; f_{ад}; f_y), \quad (1.10)$$

де $F(0,05; f_{ад}; f_y)$ – табличне значення критерію Фішера з прийнятою довірчою імовірністю, що дорівнює 0,95; $f_{ад} = n - k - 1$ – число ступенів вільності дисперсії адекватності; f_y – число ступенів вільності дисперсії відтворюваності (у даному випадку $f_y = n$). $s_{ад}$ – дисперсія адекватності, квадрат якої розраховується за наступним виразом:

$$s_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^n (\bar{y}_u - y_u)^2}{n - k - 1}, \quad (1.11)$$

where y_u is the calculated value of the response in the u -th trial.

If, the analysis of the derived findings results in the linear model is inadequate, then it is necessary to go to the 2nd order model and, accordingly, to the 2nd order designs (in this case it is not considered). If the model is adequate, then the final stage of the experimental design is executed. It is necessary to assess the significance of the regression equation coefficients. It is usually carried out with the help of the so-called Student's test. The coefficient is considered as significant if the following condition is fulfilled:

$$|b_i| \geq \Delta b_i = t(0,05; f_y) \frac{s_y}{\sqrt{n}}, \quad (1.12)$$

where $t(0,05; f_y)$ is the tabular value of the Student's criterion at 95% confidence probability and f_y number of degrees of freedom.

If given condition is not fulfilled (i.e. the coefficient is insignificant), then it can be neglected in the regression equation (i.e., it is taken equal to zero).

1.3 Testing: Notion, Content, Engineering Specifications

The processes of development (R&D-works), industrial production and exploitation of E&PEA are impossible without all-round tests with consideration of the features of the apparatus (device) and exposure of various destabilizing factors in its operation process.

In a general case, testing is understood as an experimental determination of the quantitative and (or) qualitative characteristics of the apparatus under certain simulated actions (exposures) on it according to a given program. It should be noted that practically all test programs for E&PEA contain certain types of tests that do not involve any actions on the apparatus (e.g., visual inspection, measuring overall and mounting dimensions, resistances of its individual components, etc.); nevertheless, they are also considered as testing.

$$s_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^n (\bar{y}_u - y_u)^2}{n - k - 1}, \quad (1.11)$$

де y_u – розраховане значення відклику в u -й спробі;

Якщо в результаті аналізу з'ясувалось, що лінійна модель неадекватна, то переходять до моделі 2-го порядку і відповідно до планів 2-го порядку (у даному випадку не розглядається). Якщо ж модель адекватна, то приступають до виконання завершального етапу планування експерименту: **оцінки значущості коефіцієнтів рівняння регресії**, яка здійснюється частіш за все за допомогою т.з. *критерію Стьюдента*. Коефіцієнт вважається значущим, якщо виконується наступна умова:

$$|b_i| \geq \Delta b_i = t(0,05; f_y) \frac{s_y}{\sqrt{n}}, \quad (1.12)$$

де $t(0,05; f_y)$ – табличне значення критерію Стьюдента при 95 % довірчої імовірності і числі ступенів вільності f_y .

Якщо виявляється, що даний коефіцієнт не є значущим, то їм у рівнянні регресії можна зневажити, тобто прийняти таким, що дорівнює нулю.

1.3 Випробування: поняття, зміст, технічна документація

Процеси розробки (НДР та ДКР), промислового виробництва й експлуатації ЕЕА неможливо собі уявити без різноманітних випробувань з урахуванням специфіки апарата і впливу на нього в процесі експлуатації різних дестабілізуючих чинників.

У загальному випадку, під випробуваннями розуміють експериментальне визначення кількісних та (або) якісних характеристик апарата при відтворенні певних дій на нього за заданою програмою. Слід зазначити, що майже усі програми випробувань ЕЕА містять певні види випробувань, що не передбачають будь-яких дій на апарат (наприклад, зовнішній огляд, вимірювання габаритних та установчих розмірів, опорів окремих елементів і т. п.), але вони також вважаються випробуваннями.

The general purpose of testing is to derive information about the state of the apparatus under test, as well as its behavior under predetermined exposures. This information not always can be used directly; in a number of cases, it need computer processing with the use of certain software. The test findings can be used hereafter to solve certain problems: refinement of the apparatus, construction and correction of mathematical models, etc.

According to the definition noted above, tests are considered as a proper experiment, however, in actual situation, tests represent a major complex of various activities (works) that are performed during preparation and execution of experiments, as well as analyzing their results, developing appropriate documentation, etc. Thus, regardless of the type of apparatus, its functional purpose, of the type of tests being conducted, and their specific tasks, all these activities can be presented as three sequential stages.

The first is *preliminary stage* including execution of the following works: formulation of the purpose and tasks of the tests; drawing up the schedule of the tests; the development of the test program and procedure; the determination of approximate composition of necessary testing equipment. The second stage is the *tests proper* including the following works: verification, preparation and adjustment of test equipment and measuring means, as well as execution of the experiment and corresponding measurements and observations. The third is the *final stage* including the following works: processing and analyzing of the measurements; estimation of the test findings; development of relevant records (drawing up a test report with conclusions and recommendations).

The main manual for conducting tests is "*The test program and procedure*". It is a variety engineering record developed in parallel with the development of production records for the apparatus. It is developed for each apparatus type and for each test type (acceptance, periodic, type, operational etc.). It must be aimed to obtain maximal information required to take decision according to the purpose of the tests at minimal material and financial expenses. Therefore, the development of test program and procedure is a very important stage in the development of engineering records. Test program and procedure is developed in strict compliance with the current national and international standards, IEC Standards and Publications and specifications for the corresponding apparatus types. Test program and procedure usually includes the following information:

- types of tests to which this device is subjected;
- the specific purpose of this or that test type;

Загальною метою випробувань є здобуття інформації про стан випробуваного апарата, а також його поведінку при заданих діях. Ця інформація не завжди може бути використана безпосередньо; в ряді випадків вона вимагає комп'ютерної обробки з застосуванням відповідного програмного забезпечення. Результати випробувань у подальшому можуть використовуватись для вирішення певних задач: доопрацювання апарата, отримання та уточнення математичних моделей та ін.

Відповідно до визначення, наданого вище, під випробуваннями розуміють власне експеримент, проте у дійсності випробування являють собою широкий комплекс заходів щодо підготовки і проведення експериментів, аналізу їх результатів, розробки відповідної документації і т. д. Отже, незалежно від виду апарата, його функціонального призначення, виду випробувань, що проводяться, та конкретних задач, які стоять перед ними, ці заходи можна виділити у три характерних етапи:

- *попередній етап*, на якому здійснюється формування цілі та задач випробувань, упорядкування планів випробувань, розробка програми випробувань, визначення приблизного складу необхідного випробного устаткування;

- *безпосередньо випробування*: на цьому етапі здійснюється перевірка, підготовка, налаштування випробного устаткування і вимірювальних засобів, а також виконання самої процедури експерименту;

- *заключний етап*: на даному етапі проводиться опрацювання результатів вимірів, їх аналіз, оцінка результатів випробувань, формулювання висновків і рекомендацій щодо подальшої роботи.

Основним посібником з проведення випробувань є «Програма та методика випробувань» (ПМ). ПМ є конструкторським документом, який розробляється паралельно з розробкою конструкторської документації на апарат. ПМ розробляється для кожного виду апарата і на кожний вид випробувань (приймально-здавальні, періодичні, типові і т. д.), вона передбачає здобуття максимуму інформації, необхідної для прийняття рішень у відповідності з метою даних випробувань з урахуванням економічної доцільності. Тому розробка ПМ є важливим етапом розробки конструкторської документації. ПМ розробляється у відповідності до діючих національних та міжнародних стандартів, рекомендацій МЕК, технічних умов на відповідні види апаратів. ПМ у загальному випадку містить у собі:

- види випробувань, яким підлягає даний апарат;
- конкретну ціль того або іншого виду випробування;

- references to the standards valid for the test to be conducted;
- a detailed sequence of operations (stages) for each type of the test to be performed;
- the number of products from the batch to be tested;
- electrical circuits, the equipment used, instrumentation and measurement techniques;
- the parameters being determined; techniques for their determination and form of representation of the test findings;
- frequency of carrying out this or that type of tests, form for reporting and other information.

Test results should be used as quickly and efficiently as possible. For this purpose, they must be in specific manner drawn up and at the right time represented for interested persons. Test results are drawn up as "Test report" that in general case includes the following information:

- general remarks that includes the name of the test object, its brief performance, the purpose of the tests, reference to relevant standards and specifications;
- a summary of the tests and methods of their performance;
- measurement results represented as tables, diagrams, oscillograms, histograms etc.;
- inferences including summaries from test results, as well as appropriate recommendations;
- appendices.

The test report is signed by the testers (the persons who directly performed the experiments and drew up the report), as well as by the management of the departments and is confirmed by the management of the institution that performed the tests.

1.4 Classification of Tests

As already noted, tests are carried out at all stages of the development of devices, as well as during their industrial production and operation. So, one of the main features regarding the classification of tests is the classification depending on the stage.

- посилання на стандарти, у відповідності, з якими проводяться випробування;
- детальна послідовність операцій (етапів) при проведенні кожного виду випробувань;
- кількість виробів з партії, що підлягають випробуванням;
- електричні схеми, устаткування, що застосовується, засоби і методи вимірів;
- параметри, що визначаються, методи їх визначення та форма надання;
- періодичність проведення того або іншого виду випробувань, форма звітності і т. д.

Результати випробувань повинні по можливості швидко та ефективно використані. Для цього вони повинні бути відповідним чином оформлені і своєчасно доведені до зацікавлених осіб. Результати випробувань оформлюються у вигляді *«Протоколу випробувань»*, який містить у собі:

- загальні відомості, які містять найменування об'єкта, що випробується, його стисла характеристика, ціль випробувань, посилання на відповідні стандарти та технічні умови;
- стислий зміст випробувань і методи їх проведення;
- результати вимірів, надані у вигляді таблиць, графіків, осцилограм, діаграм, гістограм і т. д.;
- висновок, в якому надаються основні результати випробувань і відповідні рекомендації;
- додатки.

Протокол випробувань підписується випробувачами (тобто особами, які безпосередньо проводили експеримент і склали протокол), а також керівництвом підрозділу і затверджується керівництвом організації (підприємства), що проводило випробування.

1.4 Класифікація випробувань

Як вже зазначалось, випробування проводяться на всіх етапах розробки апаратів, а також в процесі їх промислового виробництва та експлуатації. Отже, одним з основних ознак щодо класифікації випробувань є класифікація в залежності від етапу.

At the R-work stage, that is, in the process of carrying out scientific research, the prototypes of devices or their individual components are made that undergo all-round research and testing; numerous experiments are conducted. Tests that are carried out in the R-work process are usually called *research tests*. The main tasks of such tests are:

- to verify observance of the operating principle and confirm the fundamental technical conceptions for the apparatus being designed;
- to verify compliance with the claimed performances of the apparatus and the requirements, imposed upon it, to actual ones; availability of safety margins as to specific performances;
- to determine the characteristics that could not be revealed a priori or determined by calculations; to find regularities for constructing mathematical models, empirical dependencies;
- to reveal the ultimate capabilities of the apparatus or its individual components, as well as the performances under extreme conditions or environmental exposures;
- to find possible ways to improve the performances of the apparatus in the process of further research, as well as properly directions of the research and other problems.

Research tests are usually performed in specially equipped research laboratories at leading institutions carrying out new developments or special research centers having the appropriate test equipment. One variety of research tests are so-called *developmental tests*, performed for the purpose to estimate the influence of changes being introduced in the apparatus construction in the course of refinement to improve engineering solutions (e.g., the influence of the contact material on their heating, electrical erosion etc.).

At the D-work, mock-ups and prototypes are made that undergo so-called *check tests* that include preliminary and acceptance tests. *Preliminary tests* are performed for the purpose to ascertain the possibility of *acceptance (official) tests* performed to decide the expediency of industrial production of designed apparatus or putting into operation of individually manufactured apparatus. The acceptance tests must ensure the verification of all requirements imposed upon the designed apparatus in compliance with specifications. A special expert commission is formed to estimate the acceptance test outcomes. The problem of the tests at this stage is extremely complicated, since the inference must be made based on the test results of a rather small number of apparatus, and frequently a unique sample.

На етапі НДР, тобто в процесі виконання наукових досліджень, виготовляються макети апаратів або окремих їх елементів, які піддаються всебічним дослідженням і випробуванням; проводяться численні експерименти. Випробування, які проводяться в процесі НДР за звичаєм називають *дослідницькими випробуваннями*. Основними задачами таких випробувань є:

- перевірка дотримання задуманого принципу дії; підтвердження основних технічних ідей, на яких побудовано апарат;
- перевірка відповідності параметрів і вимог, що заплановані, реальним; наявності запасів з окремих параметрів;
- визначення характеристик, що не могли бути встановлені апріорно або визначені розрахунковим шляхом; визначення закономірностей для створення математичних моделей, емпіричних залежностей;
- визначення граничних можливостей апарата або окремих його елементів, а також їх характеристик при екстремальних умовах або зовнішніх впливах;
- визначення можливих шляхів покращання характеристик апарата в процесі подальших досліджень, а також напрямки самих досліджень тощо.

Дослідницькі випробування проводяться, як правило, у дослідницьких лабораторіях при головних організаціях, що здійснюють нові розробки або спеціальні дослідницькі центри, що мають необхідне випробне устаткування. Різновидом дослідницьких випробувань є *доводжувальні випробування*, які проводяться з метою оцінки впливу змін, що вносяться у конструкцію, в процесі доведення апарата, вдосконалення технічних рішень (наприклад, впливу матеріалу контактів на їх нагрів, електричну ерозію і т. п.).

На етапі ДКР виготовляються макети та дослідні зразки, які піддаються т.з *контрольним випробуванням*, які містять у собі попередні та приймальні випробування. *Попередні випробування* проводять з метою визначення можливості пред'явлення апаратів, що розроблюються, на *приймальні випробування*. За результатами приймальних випробувань вирішується питання про доцільність серійного виробництва апаратів або передачі до експлуатації апаратів індивідуального виготовлення. Вони повинні забезпечити перевірку усіх вимог до апарата, що передбачені технічним завданням. Для оцінки результатів приймальних випробувань створюється експертна комісія. Перед випробуваннями на цьому етапі стоїть досить складна задача, тому що висновок необхідно зробити за результатами випробувань порівняно малого числа апаратів, а найчастіше і єдиного зразка.

At the pre-production stage, the pilot run of apparatus, made in compliance with production technology, undergo corresponding *pre-production* or *qualifying tests*.

Industrial production of power electrical and electronic apparatus includes step-by-step operation control, acceptance, periodic and type tests.

Step-by-step operation control consists in a number of verifications and measurements being performed during the manufacture of the apparatus. In this case, certain units of the apparatus, once their assemblage is completed, undergo operational checking. For example, for instrument transformers, typical types in step-by-step operation control consist in the following: verification of the turn number of windings and correctness of their termination designations; measuring the magnetizing current and measurement errors for the transformer magnetic system; insulation resistance measurements and other.

Approval or *acceptance tests* are performed whenever technological cycle of the apparatus production is terminated. Such tests usually consist in verification of most important performances that confirm the operability of the apparatuses being produced. Approval tests in fact are one of the stages of the technology cycle, and are performed by technical inspection departments of the manufacturer or by representatives of the customer in the presence of a representative of the manufacturer.

Periodic tests are performed for the purpose to verify stability of quality of the apparatuses being produced and the technology of their production. The extent and terms of periodic tests is specified by the production forms and specifications (approximately once per 1–5 years). The outcomes of periodic tests define the expedience to continue the production of this type apparatuses. *Type tests* are usually performed in the case when the apparatus design or production technology is essentially changed for the purpose of improvements. Periodic and type tests must ensure verification of all requirements imposed upon the apparatus by the engineering specifications.

The electrical equipment (mostly the ones for high-voltage applications) that is in operation undergo so-called *preventive-maintenance tests*. The purpose of these tests is to verify the most important components and parameters of the equipment. The condition of electric insulation is most frequently checked in preventive-maintenance test process.

На етапі освоєння серійного виробництва випробуванням піддається перша партія апаратів, виготовлених за технологією серійного виробництва. Ці випробування називають *кваліфікаційними*.

Серійне виробництво ЕЕА містить у собі операційний контроль, приймально-здавальні, періодичні та типові випробування.

Операційний контроль передбачає низку перевірок та вимірювань, що виконуються в процесі виготовлення апарату. Випробуванням у даному випадку піддаються, зазвичай, окремі вузли апарату після завершення їх складання. Наприклад, для вимірювальних трансформаторів характерними видами випробувань при операційному контролі є: перевірка кількості витків обмоток і правильності позначення їх виводів, вимірювання струму намагнічування магнітопроводу, вимірювання похибок на магнітопроводі, вимірювання опору ізоляції та ін.

Приймально-здавальні випробування виконуються після завершення технологічного циклу виготовлення апарату. Вони передбачають, як правило, контроль найважливіших параметрів, що підтверджують працездатність виготовленого апарату. Приймально-здавальні випробування є по суті одним з етапів технологічного циклу, і здійснюється відділами технічного контролю на підприємствах-виробниках або представниками замовника в присутності представника виробника.

Періодичні випробування проводять з метою контролю стабільності якості апаратів і технологічного процесу їх виробництва. Вони здійснюються в об'ємах і в терміни, що встановлені нормативно-технічною документацією (приблизно один раз у 1–5 років). За результатами періодичних випробувань визначають доцільність продовження серійного виробництва даного апарата. *Типові випробування* найбільш часто проводяться у випадку істотної зміни конструкції апарата або технології його виготовлення. Періодичні та типові випробування повинні забезпечити перевірку відповідності апарата технічної документації.

Електричні та електронні апарати, здебільшого апарати високої напруги, що знаходяться в **експлуатації** піддаються *профілактичним випробуванням*. Їх метою є перевірка параметрів, порушення яких може привести до серйозних збоїв у роботі розподільних пристроїв. Частіше усього в процесі профілактичних випробувань здійснюється перевірка електричної міцності ізоляції.

It should be noted that besides the classification of tests depending on the stage, there are their classifications based on other characteristics. According to the test conditions and test place, there are *bench, laboratory, polygon, full-scale, simulation, operational* etc. tests. According to the test duration, there are *normal, accelerated, abbreviated, cyclic* etc. tests. According to the type of influence on the apparatus, there are *mechanical, thermal, electrical, electromagnetic, environmental, chemical* etc. tests.

There is also classification with respect to performances and parameters to be determined. The following type of tests are typical for power electric and electronic apparatuses:

- *electromechanical tests* that include: checking the operation of the apparatus mechanisms and interlocking systems; contact pressure measurements; actuation time measurements etc.;

- *electromagnetic tests*: magnetizing and no-load currents measurements; verifications of connection group and designation correctness of windings; turns ratios and errors measurements of instruments transformers etc.;

- *temperature-rise tests* under nominal current at design operation; these tests are also known as *loading tests*;

- *dielectric tests*: withstand voltage tests, dielectric loss test, partial discharge test and others;

- *short-time and peak withstand short-circuit current tests*;

- *switching tests*: breaking capacity test, electrical life test etc.;

- checking of drive pulses and control performance;

- *mechanical tests*: mechanical life test, shock and vibration resistance test, mechanical stress test, wind-load stability test, transportation test, etc.;

- *environmental tests*: testing for exposure of extreme ambient temperatures and temperature change, humidity, rain, solar radiation, hoarfrost, salt-mist, dust, pollution etc.

As already noted there are also tests that are not involved in any impact on the apparatus and determination of its characteristics, such as external inspection, check of completeness, overall, mounting dimensions, weight, wiring and marking, etc.

Слід зазначити, що поряд з класифікацією випробувань в залежності від етапу, існують їх класифікації за іншими ознаками. В залежності від умов і місця проведення розрізняють випробування *стендові, лабораторні, полігонні, натурні*, випробування з використанням *моделей, експлуатаційні* і т. д. В залежності від тривалості випробувань *нормальні, прискорені, скорочені, циклічні*. В залежності від виду дії на апарат – *механічні, термічні, електричні, електромагнітні, кліматичні, хімічні* і т.д.

В залежності від характеристик, що визначаються, для ЕЕА є характерними наступні види випробувань:

- *електромеханічні випробування* (перевірка роботи механізмів апарата, блокувань різного призначення, вимірювання контактних напруг, часових параметрів спрацьовування і т. п.);

- *електромагнітні випробування* (вимірювання струму намагнічування та холостого ходу, перевірка групи з'єднання та правильності позначення обмоток, вимірювання коефіцієнтів трансформації та похибок вимірювальних трансформаторів та ін.);

- *випробування на нагрів* номінальним струмом або *навантажувальні випробування* при заданому режимі роботи апарата;

- *випробування електричної ізоляції* (*діелектричні випробування*);

- *комутаційні випробування*;

- *випробування на стійкість при протіканні струмів короткого замикання*;

- *перевірка керуючих імпульсів та регулювальних характеристик*;

- *механічні випробування* (на механічну зносостійкість, удароміцність і вібростійкість, механічні впливи, стійкість при транспортуванні, перевірка ступеня захисту оболонки корпусу і т.п.);

- *випробування на вплив факторів навколишнього середовища* (граничної температури навколишнього середовища та її зміни, вологості, дощу, сонячного випромінювання, інію, пліснявих грибів, соляного туману, пилу тощо).

Як зазначалося, існують також випробування, які не пов'язані з будь-яким впливом на апарат і визначенням будь-яких його характеристик. До них належать *зовнішній огляд, перевірка комплектності, габаритних, приєднувальних та настановних розмірів, маси, монтажу та маркування* тощо.

1.5 Technical Means for Conduction of Research and Testing

Research and testing E&PEA with no use of appropriate technical means (test equipment) is impossible. First and foremost, it should be noted that the use of one equipment or another depends on the test type. In the general case, technical means of testing, depending on the purpose, can be divided into the following groups:

- sources of electrical energy;
- converters of electrical energy;
- electrical energy distribution devices;
- instrumentation and recording devices;
- specialized test beds;
- additional devices and accessories.

Sources of electrical energy ensure the supply of electricity to test beds and installations. The power of the source must be sufficient to carry out tests at the highest values of current and voltage predetermined by the test purposes. Power sources are usually located in a separate room. However, low-voltage power sources are placed directly in the laboratories near the test beds for the purpose to reduce the voltage drop in the supply wires.

Electric energy converters, namely transformers, rectifiers, stabilizers, regulators, etc., provide conversion and regulation of current and voltage within specified limits with sufficient stability of conversion parameters.

Electrical energy distribution devices are usually cubicles wherein switching and protective equipment, as well as measuring devices, are installed.

Instrumentation and recording devices include a wide variety of measuring devices, measuring transducers, as well as systems for recording and processing experimental data. The composition of these devices is determined by the variety of measurands, as well as the processes under research in both static and dynamic conditions. Modern instrumentation and recording systems are usually computer-integrated complexes. Their correct application requires special skills and knowledge; otherwise, the research results may be absurd. In this case, when organizing measurements of various pulse signals, as well as processes occurring in short time intervals, it should be carried out preliminary thorough analysis of the capabilities of these devices

1.5 Технічні засоби для проведення досліджень та випробувань

Дослідження та випробування електричних та електронних апаратів неможливо проводити без відповідних технічних засобів. По-перш за все, слід зазначити, що використання тих чи інших засобів залежить від виду випробувань. У загальному випадку технічні засоби випробувань в залежності від призначення можуть бути поділені на наступні групи:

- джерела електричної енергії;
- перетворювачі електричної енергії;
- пристрої розподілу електричної енергії;
- контрольно-вимірювальні та реєструвальні прилади;
- спеціалізовані випробувальні стенди;
- додаткові пристрої та приладдя.

Джерела електричної енергії забезпечують постачання електроенергії випробувальних стендів і установок. Потужність джерела повинна бути достатньою для проведення випробувань при найбільших значеннях струму та напруги, передбачених випробувальними цілями. Джерела живлення як правило розташовуються в окремому приміщенні. Проте низьковольтні джерела живлення з метою зменшення падіння напруги в живлячих провадах, розташовують безпосередньо в лабораторіях поблизу випробувальних стендів.

Перетворювачі електричної енергії, а саме трансформатори, випрямлячі, стабілізатори, регулятори тощо, забезпечують перетворення й регулювання струму та напруги у заданих межах з достатньою стабільністю параметрів перетворення.

Пристрої розподілу електричної енергії як правило являють собою шафи, в яких встановлюються комутаційна та захисна апаратура, а також вимірювальні пристрої.

Контрольно-вимірювальні та реєструвальні прилади містять у собі велике різноманіття вимірювальних пристроїв, вимірювальних перетворювачів, а також системи реєстрації та обробки експериментальних даних. Склад цих приладів визначається різноманітністю вимірюваних величин, а також досліджуваних процесів як у статичних, так і динамічних режимах. Сучасні контрольно-вимірювальні системи являють собою, як правило, комп'ютерно-інтегровані комплекси. Їх правильне застосування потребує спеціальних навичок та знань, в противному випадку можна результати досліджень можуть мати абсурдний характер. У цьому випадку має бути проведено попередній ретельний аналіз можливостей цих приладів при організації вимірювань різних імпульсних сигналів, а також процесів, що протікають за короткі проміжки часу.

Specialized test beds are devices that contain various devices, connector systems, voltage regulators, load terminals, alarms and other devices and gadgets necessary to control by the operation of the device being tested.

Additional devices and accessories are usually such elements as additional resistors, reactors, instrument transformers, etc.

Specification documents as for the operation of the test equipment are as follows: current "Operating Rules of Consumer Electrical Installations" and "Safe Operating Rules of Consumer Electrical Installations". Service personnel must undergo appropriate training taking into account specific work conditions. Laboratories or premises where apparatus tests are carried out in compliance with ДСТУ7238: 2011 and ДСТУ7239: 2011 must be provided with a sufficient number of means of collective and individual protection. In particular, dangerous areas must be fenced off; the test device must have a fence with blocking. Light and sound signaling, etc. should be provided. [9–12].

1.6 Requirements to Electric and Power Electronic Apparatus

Testing power electrical and electronic apparatus (with the exception of research ones) are usually performed in compliance with the requirements established by engineering specifications, such as national standards of Ukraine (ДСТУ, ГОСТ); foreign standards, which valid in Ukrainian territory; international standards and recommendations (e.g., IEC standards and publications). *IEC (International Electro-technical Commission)* is international institution dedicated to the standardization of requirements imposed upon electrical products, as well as test methods and instrumentation.

Among the numerous requirements imposed on power electrical and electronic apparatus by engineering specifications, first and foremost, it should be noted a group of requirements that determines the ability of the apparatus to perform own functions. The requirements upon the apparatus electrical isolation is of vital importance in this group of requirements.

It should be noted that insulation is one of the most responsible elements of the apparatus, since its failure leads to grave malfunctions (and on occasions – to the faults) in power systems. Therefore, ensuring the reliable operation of the insulation is one of the main tasks facing the developers and producer of apparatus, as well as institutions responsible for their installation, maintenance (including preventive tests), and operation.

Спеціалізовані випробувальні стенди являють собою пристрої які містять різні прилади, системи з'єднувачів, регулятори напруги, виводи навантажень, сигналізація та інші пристрої та пристосування, необхідні для керування роботою випробуваного апарату.

Додаткові пристрої та приладдя це, за звичаєм, такі елементи як додаткові резистори, реактори, вимірювальні трансформатори тощо.

Нормативними документами щодо експлуатації випробувального обладнання є діючі «Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів» та «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів». Обслуговуючий персонал повинен проходити відповідний інструктаж з урахуванням специфічних умов роботи. Лабораторії або приміщення, де проводяться випробовування апаратів відповідно до ДСТУ 7238:2011 та ДСТУ 7239:2011 повинні бути в достатній кількості забезпечені засобами колективного та індивідуального захисту. Зокрема, небезпечні ділянки повинні бути обгороджені, випробуваний апарат повинен мати огороження з блокуванням. Повинна бути передбачена світлова та звукова сигналізація і т.д. [9–12].

1.6 Вимоги до електричних та електронних апаратів

Випробування електричних та електронних апаратів (за винятком дослідницьких) проводяться у відповідності до вимог, які встановлені нормативно-технічною документацією: національними стандартами України – ДСТУ; іноземними стандартами, які діють на території України; міжнародними стандартами та рекомендаціями (наприклад, рекомендаціями та стандартами МЕК). МЕК (міжнародна електротехнічна комісія) – міжнародна організація, яка займається стандартизацією вимог до електротехнічної продукції (у тому числі електричних апаратів), зокрема, стандартизацією методів випробувань та вимірювальної апаратури.

Серед численних вимог, що пред'являються до ЕЕА стандартами, технічними умовами, конструкторською документацією, у першу чергу, необхідно відзначити групу вимог, що визначає спроможність апарата виконувати свої функції. Зазначена група містить у собі велику різноманітність вимог, серед яких у першу чергу необхідно виділити вимоги до ізоляції.

Необхідно відзначити, що ізоляція є одним з відповідальніших елементів апарата, оскільки порушення в її роботі ведуть до серйозних збоїв (а в окремих випадках до аварій) в електричних системах. Тому забезпечення надійної роботи ізоляції є однією з головних задач, що стоять перед розробниками та виробниками апаратів, а також організаціями, що здійснюють їх монтаж, технічне обслуговування (у тому числі профілактичні випробування) й експлуатацію.

In general, the features required for insulation of power electric and electronic apparatus are formulated in such a way. The apparatus insulation must withstand long-term (during all service life) stress of rated (maximum operating) voltage, as well as short-term stresses of lightning surges and system-generated overvoltages (switching surges) under environmental exposures, such as pollutions, dropout of dew and hoarfrost, torrential rains, hydrochloric fog etc. The requirements imposed upon insulation of medium and high voltage apparatus are specified by international standards [15, 33–35], of low voltage apparatus by [16, 32, 36, 37]. Requirements to insulation are confirmed also in standards and specifications on the particular apparatus types. The verification of these requirements is performed with *dielectric tests* by withstand voltage and other dielectric measurements characterizing the quality of the insulation, such as leakage currents, direct-current resistance, dielectric factor etc. (see subsection 3).

Along with insulation requirements, there are also some other features required of power electric and electronic apparatus according to their operating conditions. The service experience has revealed existence (from the standpoint of current load duty) of three basic operating conditions, namely, nominal, overload and short-circuit.

Rated (nominal) condition. It is normal operating condition characterized by long-term operation of the apparatus under load current. The main requirement imposed upon practically all power electrical and electronic apparatus is to ensure *design thermal behaviour*. This means that the temperatures of the current-carrying components (buses, flexible connections, contacts and contact connections, coils etc.) and other parts of the apparatus should not exceed the permissible values established by the standards [16, 32–35], or by the technical specifications for the corresponding types of apparatus or their components. This requirement is confirmed by *temperature-rise tests* under a nominal current in the design loading duty [8, 17, 32–37].

Some types of switching devices in nominal conditions are imposed by the requirement in respect to *switching wear resistance* or *electrical life*. It particularly refers to switching devices for frequent switching operations, such as low voltage DC and AC contactors. This means that in operation process the apparatus must ensure specified number of switching (make-break) operations under load current with specified parameters at given *switching frequency*. These parameters are established by appropriate standards [16, 32]:

У цілому, вимоги до ізоляції електричних та електронних апаратів можна сформулювати таким чином. Ізоляція апарата повинна витримувати довгостроково (протягом усього терміну служби) номінальну напругу, а також короткочасну дію зовнішніх (грозових) і внутрішніх (комутаційних) перенапруг за впливу дестабілізуючих чинників: забруднення, випадання роси, зливи, соляного туману і т. д. Вимоги до ізоляції електричних апаратів високої напруги визначаються [15, 33–35], апаратів низької напруги – [16, 32, 36, 37]. Вимоги до ізоляції апаратів також підтверджуються в стандартах і технічних умовах на конкретні їх види. Перевірка зазначених вимог здійснюється відповідними випробуваннями електричної міцності ізоляції та іншими вимірюваннями, що характеризують якість ізоляції (див. розділ 3).

Поряд з вимогами до ізоляції, до електричних апаратів пред'являється ряд інших вимог, які визначаються їх режимом навантаження. Практика експлуатації електричних апаратів показує наявність (за струмовим навантаженням) трьох основних експлуатаційних режимів: номінальний режим, режим перевантаження і режим короткого замикання.

Номінальний режим або **режим номінального навантаження** є нормальним експлуатаційним режимом і характеризується тривалою роботою апарата при протіканні номінального струму. Основною вимогою, яка стосується практично усіх електричних та електронних апаратів, є забезпечення оптимального теплового режиму. Це означає, що температури струмоведучих і інших частин апарата не повинні перевищувати допустимих значень, які встановлено стандартами [16, 32–35], або технічними умовами на відповідні види апаратів або їх елементів. Перевірка даної вимоги здійснюється випробуваннями на нагрів номінальним струмом у відповідному режимі [8, 17, 32–37].

До окремих видів комутаційних апаратів у номінальному режимі пред'являється вимога *комутаційної зносостійкості*. Це стосується зокрема комутаційних апаратів призначених для частих комутацій (контактори постійного та змінного струму низької напруги). Відповідно до цієї вимоги, апарат в процесі експлуатації повинен забезпечити задану кількість комутаційних операцій при заданих параметрах електричного кола, що комутується, і заданої частоти комутацій. Ці параметри встановлені відповідними стандартами [16, 32]:

- the number of switching CO (close-open) cycles is picked from a series of values: 300, 630, 800, 1000, ..., 10 000 000;
- the parameters of the circuit to be switched defined by the so-called *utilization category*: DC1...DC5 (for DC apparatus), AC1...AC4 (for AC apparatus) etc.;
- switching frequency is also picked from a value series in the range of 1 to 600 CO operations per one hour.

These parameters must be provided in performing *switching life test* that confirms this requirement [8, 17, 32].

Overload conditions. These conditions are featured by the time-limited flowing the current exceeding by several (3–10) times the rated value. There are distinguish the faulty overloads and technological overloads. The overloads are mainly caused by opened line, started induction motor, non-synchronous power-up of a generator, superexcitation of powerful synchronous machines etc. There following requirements are imposed upon power electric and electronic apparatus in these conditions:

- *overload capability* (with respect to the thermal behaviour);
- *selectivity*: this requirement is imposed upon the apparatus providing the protective functions of main equipment; it consists in that to ensure reliable operation of the apparatus in the events of long-term (faulty) overloads as well as absence of its response to the short-time (technological) overloads;
- *switching capability*: it is imposed upon switching devices and consists in that to ensure reliable interruption of overload current at the predetermined parameters of the circuit being interrupted according to utilization category for infrequent operations [16, 32]; this requirement is confirmed by *breaking capacity test* in overload conditions [8, 17].

Short-circuit condition. This is emergency condition featured with extremely high currents that by tens times exceed the rated values. Practically all power electrical and electronic apparatus are imposed by the requirement of *stability under passing short-circuit currents*. That is, regardless of the functional purpose, the apparatus must withstand the electro-dynamical and thermal action of let-through short-circuit current without failures inhibiting its further normal operation [16, 32–37].

- кількість комутаційних циклів ВО вибираються зі стандартного ряду значень: 300, 630, 800, 1000, ..., 10 000 000;
- параметри кола, що комутується, визначаються так званою категорією використання: ДС1...ДС5, АС1...АС4 та ін.;
- частота комутацій також вибирається зі стандартного ряду значень в межах 1...600 1/годину.

Ці параметри повинні бути забезпечені при проведенні *випробування на комутаційну зносостійкість*, яким здійснюється перевірка цієї вимоги [8, 17, 32].

Режим перевантаження характеризується обмеженням за часом протіканням струму, що у декілька разів (3...10) перевищує номінальний. Розрізняють аварійні і технологічні перевантаження. Основними причинами перевантажень є: обрив фази, пуск асинхронного двигуна, несинхронне вмикання генератора, форсоване збудження потужних синхронних машин і т. д. У даному режимі до електричних та електронних апаратів пред'являються наступні вимоги щодо:

- *перевантажної спроможності* (по тепловому фактору);
- *селективності*: ця вимога стосується апаратів, які здійснюють функції захисту основного електроустаткування; воно полягає у тому, щоб забезпечити надійне спрацювання при аварійних перевантаженнях та неспрацювання при технологічних перевантаженнях;
- *комутаційної спроможності*: ця вимога стосується комутаційних апаратів і полягає у тому, щоб забезпечити надійне вимикання кола при заданих її параметрах (в режимі перевантаження) у відповідності до категорії використання в режимі рідких комутацій [16, 32]. Перевірка останньої вимоги здійснюється проведенням *випробувань на комутаційну спроможність* у відповідності до режиму роботи [8, 17].

Режим короткого замикання – є аварійним режимом для електроустаткування і характеризується стрімким зростанням струму, який у десятки разів може перевищувати струм нормального режиму. Практично до усіх електричних та електронних апаратів пред'являється вимога щодо *стійкості при протіканні струмів короткого замикання*. Тобто, незалежно від функціонального призначення апарат повинен витримувати без ушкоджень, що перешкоджають його подальше функціонування, електродинамічну та термічну дію наскрізних струмів к.з. [16, 32–37].

Switching apparatus providing protection of the main electrical equipment are imposed upon the requirement of *switching* capability [16, 32, 33, 35]. That is, the device must be able to interrupt reliably the circuit in the event of a short-circuit fault. In addition, the switching devices providing reclosing operations must ensure reliable making under existent short-circuit in the circuit. To verify the specified requirements, appropriate tests in short-circuit conditions are carried out [8, 17, 32–37]:

- *peak and short-time withstand current tests*;
- *switching tests*.

It is well known that switching devices represents usually electromechanical devices. Therefore, the requirement as for its *mechanical wear resistance* should also be referred to the requirements that determine the ability of the device to perform its functions [16, 32, 33, 35]. In accordance with this requirement, the device during operation must provide a specified number of switching operations in the absence of an electrical load, that is, without consideration of electric erosion wear of its main contacts. Compliance with this requirement is verified by conducting appropriate *mechanical life test* [8, 17, 32, 33, 35].

There is another group of requirements imposed upon power electrical and electronic apparatus. It is related to influence of destabilizing factors caused mainly by external (environmental) exposures (climatic, temperature, mechanical), as well as interior processes in devices that depend on their special operating conditions. Let us consider the most important ones.

Climatic conditions are first related to environmental parameters, namely, atmospheric pressure, humidity, temperature and gas composition (presence of CO₂, hydrogen sulfide, ammonia) of the air, presence of salts, dust, sand, and industrial pollution in the air. Climatic conditions are also related to the exposure of solar radiation, as well as biological factors, such as fungal formations, products of biochemical metabolism, insects, termites, rodents, etc. In former case, consequences can be very grave, including faults.

Atmospheric pressure is defined by the meteorological conditions, as well as altitude. It affects the behavior of heat exchange of the device with its surroundings, the formation, burning and extinguishing of the electric arc, and therefore electric erosion processes and, finally, the electrical strength of the device insulation.

До комутаційних апаратів, що здійснюють захист основного електроустановки, пред'являється вимога щодо комутаційної спроможності, тобто спроможності апарата забезпечити надійне вимикання кола при виникненні к.з. Апарати, що функціонують у сполученні з пристроями АПВ, повинні також забезпечити надійне вмикання кола на існуюче к.з. Для перевірки зазначених вимог проводяться відповідні випробування в режимах к.з. [8, 17, 32–37]:

- випробування на стійкість при протіканні наскрізних струмів к.з.;
- комутаційні випробування в режимі к.з..

Добре відомо, що певна група комутаційних апаратів є електромеханічними пристроями. Отже, до вимог, що визначають спроможність апарата виконувати свої функції, слід також віднести вимогу щодо його *механічної зносостійкості* [16, 32, 33, 35]. Відповідно до цієї вимоги, апарат в процесі експлуатації повинен забезпечити задану кількість комутаційних операцій при відсутності електричного навантаження, тобто без урахування електроерозійного зносу його головних контактів. Відповідність цієї вимоги перевіряється проведенням відповідних випробувань на механічну зносостійкість [8, 17, 32, 33, 35].

Існує інша група вимог до електричних та електронних апаратів пов'язана з впливом різноманітних дестабілізуючих чинників, зумовлених, головним чином, зовнішніми факторами (кліматичними, температурними, механічними), а також внутрішніми процесами в апаратах, обумовленими особливістю режимів роботи. Розглянемо найважливіші з них.

Кліматичні умови пов'язані, уперш у чергу, з параметрами навколишнього середовища, а саме, атмосферним тиском, вологістю, температурою та газовим складом (наявністю CO₂, сірководню, аміаку) повітря, наявністю у повітрі солей, пилу, піску, промислових забруднень. З кліматичними умовами пов'язаний також вплив сонячної радіації, а також біологічних чинників: грибкових утворень, продуктів біохімічного обміну речовин, комах, термітів, гризунів і т. п.

Атмосферний тиск визначається метеорологічними умовами, а також висотою над поверхнею моря. Він впливає на режим теплообміну апарата з навколишнім середовищем, на формування, горіння і гасіння електричної дуги, а отже електроерозійні процеси і, нарешті, електричну міцність ізоляції.

Air relative humidity depends on the weather conditions and the climate type: at 40–60%, the climate is dry; up to 90–100%, it is wet one. Air humidity also affects heat exchange of the device with its surroundings, arc extinguishing process, insulation strength, as well as corrosion processes (enhanced structural wear).

The *ambient temperature* ranges from -60°C (cold climate) to $+50^{\circ}\text{C}$ (hot one). In the mountainous area, significant daily temperature fluctuations of up to 30 degrees take place that negatively affect the device thermal behavior, as well as results in dropout of dew, formation of a fog, glaze ice.

Solar radiation in combination with high temperature of the ambient air causes a significant increase (up to 100°C and more) in the temperature of current-carrying parts, which in turn causes irreversible processes in solid insulation, a decrease in its mechanical and electrical strength. It should be noted that the operation of power electronic devices is not expected at all under conditions of exposure to solar radiation.

The abundance of abrasive sand and dust in the atmosphere is typical for step and desert regions. These agents deposit on the outdoor surface of insulators, current-carrying parts, causing flashovers of insulation gaps; the normal operation of the apparatus movable components and connecting links is disturbed. These regions are also characterized by strong winds (up to 30–40 m/s) resulting in the problem of mechanical stability of the apparatus structures.

The presence of sea fog with a high salts concentration is typical in the seaside regions. Deposition of salt on the surfaces of current-carrying parts, contacts, insulators results in flashovers of isolating gaps, an increase in contact resistance and additional losses etc.

It should be noted that a number of destabilizing factors are not involved with climatic exposures. Nevertheless, they also substantially affect the operability of power electrical and electronic devices operated in industrial zones, on livestock farms or in mobile devices.

Enhanced fraction of CO_2 , hydrogen sulfide, and other active gases is typical for industrial zones, especially with metallurgical and chemical production. Heightened ammonia fraction is typical for cattle-breeding farms. Under these conditions, superficial films are formed, which substantially increase the resistance of outdoor contact (e.g., contacts of disconnectors).

Вологість повітря визначається погодними умовами та типом клімату: 40–60 % – сухий; до 90–100 % – вологий. Вологість також впливає на теплообмін з навколишнім середовищем, дугогасіння, міцність ізоляції, а також на процеси корозії (підвищений знос конструкції).

Температура навколишнього середовища змінюється від -60°C (холодний клімат) до $+50^{\circ}\text{C}$ (жаркий). У гірській місцевості спостерігаються значні добові коливання температури до 30 градусів, що можуть впливати на тепловий режим апарата, викликати випадання роси, мряки, зледеніння.

Сонячна радіація в сполученні з високою температурою навколишнього повітря викликає значне підвищення (до 100°C і більш) температури струмоведучих частин, що у свою чергу викликає незворотні процеси у твердій ізоляції, зниження її механічної й електричної міцності. Слід зазначити, що експлуатація силових електронних апаратів зовсім не передбачається в умовах впливу сонячної радіації.

Для степів і пустель характерна *наявність в атмосфері абразивного піску і пилу*. Осідаючи на поверхні ізоляторів, відкритих струмоведучих частин та елементах кінематики, викликають перекриття ізоляційних проміжків, порушують нормальне функціонування рухомих частин та з'єднуючих елементів. Для цих місцевостей характерні також сильні вітри (до 30–40 м/с), при цьому виникає проблема механічної стійкості, стійкості конструкцій апаратів.

Приморські райони характеризуються *наявністю морської мряки* з великою концентрацією солей, які осідають на поверхнях струмоведучих частин, контактів, ізоляторів, викликають перекриття ізоляції, збільшення перехідного контактного опору та додаткові втрати і т. д.

Слід відзначити, що деякі дестабілізуючі фактори не пов'язані з дією кліматичних факторів, але суттєво впливають на функціональну спроможність електричних та електронних апаратів, що експлуатуються у промислових зонах, на тваринницьких фермах або у мобільних пристроях.

Для промислових зон, особливо з металургійним і хімічним виробництвом, характерно *підвищений вміст CO_2 , сірководню й інших активних газів*. Для тваринницьких ферм характерно *підвищений вміст аміаку*. Даний чинник істотно впливає на перехідний опір відкритих контактів (наприклад, контактів роз'єднувача) .

Destabilizing factors can also be caused by *external mechanical impacts*, such as vibrations, shocks, and bumps during transportation, as well as in operation in mobile aggregates and units, such as planes, ships, and land transport. Under these conditions, false actuations of the devices, malfunctions of their mechanical structures can occur; in such cases, the resonant phenomena are especially dangerous.

Compliance of devices with these requirements is confirmed by *external factor effect testing* (including *mechanical* and *climatic* tests) [13, 30], as well as *transportation stability test* in compliance with Specs for certain types of the apparatus.

There is another characteristic group of requirements imposed upon power electric and electronic apparatus. These are requirements refers to the device construction established by the design documentation. They specify the availability of auxiliary components of various purposes in the construction. These components, primarily, directly affect performing by an apparatus of its functions. Secondly, they reduce the negative impact of destabilizing factors, as well as ensure safe service, convenience of mounting and technical maintenance (i.e., ergonomic requirements). Among these, the following components should be noted:

- components precluding spontaneous unscrewing of threaded connections(cotter pins, lock nuts, etc.);
- lubricating holes on the components operated with friction;
- protective covers on metallic surfaces;
- termination pads to connect the grounding wire;
- position indicators;
- the possibility to substitute certain details and units of the apparatus (for example, contact pieces);
- local control, alongside remote one;
- mechanical and electrical interlocking systems for safety maintenance and repair;
- signaling systems of various purpose;
- connectors for connection of control circuits and so forth.

The compliance of the devices with these requirements is confirmed in the process of approval tests, in particular, by conducting a *visual inspection* and *checking the compliance with the assembly drawing*, as well as *electro-mechanical testing*.

It should be noted that the requirements imposed upon electric equipment and the corresponding test methods yet are not completely specified, and in many cases do not take into account wide variety of their operating conditions.

Дестабілізуючі чинники можуть бути також обумовлені зовнішніми *механічними впливами*: вібраціями, ударами, поштовхами при транспортуванні, а також при роботі в мобільних агрегатах і пристроях (літаках, кораблях, сухопутному транспорті). У даних умовах можуть відбуватись помилкові спрацьовування апаратів, порушення в роботі механічної частини, особливо небезпечні в таких випадках резонансні явища.

Відповідність апаратів цим вимогам підтверджується проведенням *випробувань на дію зовнішніх чинників* (у тому числі *механічних та кліматичних випробувань*) [13, 30], а також *випробувань на стійкість при транспортуванні* відповідно до ТУ на певні види апаратів.

Існує ще одна характерна група вимог до апаратів – це вимоги до конструкції апарата, які устанавлюються конструкторською документацією. Вони передбачають наявність у конструкції апарата допоміжних елементів різного призначення, що безпосередньо впливають на виконання покладених на нього функцій, знижують негативний вплив дестабілізуючих чинників, підвищують безпеку обслуговування й експлуатації, надійність апарата, а також естетичні та ергономічні показники. Серед таких елементів можна відзначити:

- елементи, що запобігають самовідгвинчування різьбових з'єднань (шпінти, контргайки і т. д.);
- мастильні отвори на третьових елементах;
- захисні покриття на металевих поверхнях;
- контактні площадки для приєднання провідника, що заземлює;
- покажчики положення;
- можливість заміни окремих деталей і вузлів апарата (наприклад, контактів);
- місцеве керування поряд із дистанційним;
- механічні й електричні блокування для безпечного обслуговування і ремонту;
- сигналізація різного призначення;
- роз'єми для підключення кіл керування і т. д.

Відповідність апаратів цим вимогам підтверджується в процесі приймально-здавальних випробувань, зокрема проведенням *зовнішнього огляду та перевірки на відповідність складального креслення*, а також *електромеханічних випробувань*.

Слід зазначити, що вимоги до електричних та електронних апаратів і відповідні їм методи випробувань та перевірок ще не охоплені у достатній мірі нормами та технічними умовами, і у багатьох випадках не враховують різноманіття умов їх експлуатації.

2. MEASURING SYSTEMS OF TEST SETUPS AND MEASURING TECHNIQUES

As already noted, the main task of tests and experimental studies is to obtain quantitative information that characterizes the device under study under specified influences. Therefore, conducting tests, as well as experimental research, is almost always accompanied by obtaining measuring information, that is, conducting electrical, magnetic, thermal, mechanical and other measurements. Therefore, one of the key elements of any test setup is the *measuring system*, which includes a number of components.

2.1 Basic Concepts. A Brief Description of the Measurands

Measuring system is a combination of technical facilities that perceives a measuring signal and is intended to obtain measuring information.

Measuring information is a quantitative information about the properties of physical objects (information about the values of physical quantities) resulted from the measurements.

Measuring signal is a signal that carries information about the value of a measurand. In most cases, it is some kind of physical process. Its parameters are one or another function of time.

The value to be measured usually called *measurand* is a certain parameter of this process. Therefore, the concepts of measuring signal and measurand should not be equated. A physical process can be characterized by many parameters, but in each specific case, we are interested in a certain parameter of this process, someone physical quantity. In the general case, the measuring signal is not a measurand. It only carries information about this one. If, for example, we measure frequency, the input signal of the measuring device is an alternating electric current, and then the measurand is, of course, the frequency. In this case, the measuring signal contains the information about frequency.

In researching and testing electrical and electronic apparatus, highly various quantities are measured. These are, first and foremost, standard electrical quantities, such as:

2. ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ ВИПРОБНИХ УСТАНОВОК ТА МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ

Як вже зазначалося, основним завданням випробувань та експериментальних досліджень є отримання кількісної інформації, що характеризує досліджуваний апарат при заданих впливах. Тому проведення випробувань, а також експериментальних досліджень, практично завжди супроводжується отриманням вимірювальної інформації, тобто проведенням електричних, магнітних, теплових, механічних та інших вимірювань. Отже, одним з ключових елементів будь-якої випробувальної установки є *вимірювальне обладнання*, яке містить у собі низку вимірювальних пристроїв.

2.1 Основні поняття. Стисла характеристика вимірюваних параметрів

Вимірювальний пристрій являє собою комплекс технічних засобів, що сприймає вимірювальний сигнал та призначений для отримання вимірювальної інформації.

Вимірювальний сигнал – це сигнал, який несе інформацію про значення вимірюваної величини. Він у більшості випадків є якимось фізичним процесом, параметри якого є тою чи іншою функцією часу. *Вимірювана величина* – це певний параметр цього процесу. Тому не слід отожднювати поняття вимірювальний сигнал і вимірювана величина. Фізичний процес може характеризуватись багатьма параметрами, але у кожному конкретному випадку нас цікавить певний параметр цього процесу, якась одна фізична величина. У загальному випадку вимірювальний сигнал не є вимірюваною величиною, а несе лише інформацію про вимірювану величину. Якщо, наприклад, при вимірюванні частоти вхідним сигналом вимірювального пристрою є змінний електричний струм, то вимірюваною величиною є, звісно, частота, інформація про яку міститься у вимірювальному сигналі.

В процесі досліджень та випробувань електричних та електронних апаратів вимірювані величини дуже різноманітні. Це, у першу чергу, стандартні електричні величини:

- *currents* in the test circuit and current-carrying parts of equipment in a wide range of values; from leakage currents in insulation gaps (a few microamperes) to short-circuit currents (several tens of kiloamperes); the measurements are performed not only in steady-state, but in transient conditions including high-frequency (HF) and impulse currents;

- *voltages* across certain elements of apparatuses and test circuit ranging from voltage drops across contacts and current-carrying parts (a few millivolts) to testing and discharge voltages of insulation (several megavolts); also, in steady-state and transient conditions including HF and impulse voltages;

- *resistances and reactances* of certain components of apparatuses and test circuits in a wide range of values; from the resistance of contacts, current-carrying parts up to resistance of insulation gaps;

- *powers (energies)* generated by the components of electrical and electronic apparatus; also in a wide range of values in steady-state, transient and impulse conditions.

Testing and experimental research of electric and power electronic apparatuses are also related to measurements of a number of electrical parameters specific for apparatus or testing equipment, such as:

- *static and dynamic characteristics* of arc discharges, power semiconductor devices and other components;

- *characteristics partial discharges*;

- *dielectric loss tangent*;

- *recovery voltage* in the test circuit;

- *recovery strength and residual (post-zero) currents* in the residual arc (post-arc) space.

Research and testing of electrical and power electronic apparatus are also related to the measurements of non-electrical parameters:

- *magnetic quantities*, such as magnetic flux, flux density, magnetic potential drop, etc.;

- *thermal quantities*, such as temperature, temperature field heat flow, amount of heat, etc.;

- *mechanic quantities*, such as travel, speed, acceleration, mechanical forces, pressure etc.;

- *time intervals*; for example, response time of an apparatus, duration of control pulse for power semiconductor device, etc.

– *струми* у випробному контурі і струмоведучих частинах апаратів у широкому діапазоні величин: починаючи від струмів витoku в ізоляційних проміжках (одиниці мікроампер) до струмів к.з. (десятки кілоампер); причому струми вимірюються не тільки у сталому, але й у перехідному режимах, у тому числі імпульсні струми;

– *напруги* на окремих елементах апаратів та випробного контуру також у вельми широкому діапазоні величин: починаючи від падіння напруги в контактах (одиниці мілівольт) до випробних і розрядних напруг ізоляції (одиниці мегавольт); у цьому випадку також вимірюються як сталі, так і перехідні й імпульсні напруги;

– *активні та реактивні опори* окремих елементів апаратів та випробних установок у широкому діапазоні величин: від опору контактів, струмоведучих частин до опору ізоляційних проміжків;

– *потужності (енергії)*, що виділяються в елементах електричних та електронних апаратів у сталих і перехідному (імпульсному) режимах.

Дослідження та випробування електричних та електронних апаратів пов'язані також з визначенням електричних параметрів, які є специфічними для апаратів або випробного обладнання:

- *статичні та динамічні характеристики* електродугових розрядів, силових напівпровідникових приладів та ін.;

- *характеристики часткових розрядів*;

- *тангенс кута діелектричних втрат*;

- *поновлювана напруга* у випробному контурі;

- *поновлювана міцність та залишковий струм* у залишковому стовбурі дуги і т. д.

Дослідження та випробування електричних та електронних апаратів пов'язані також з вимірюваннями неелектричних параметрів:

- *магнітних*: магнітний потік, магнітна індукція, падіння магнітного потенціалу;

- *теплових*: температура, кількість теплоти;

- *механічних*: швидкості, переміщення, механічні сили, тиск;

- *часових інтервалів*: наприклад, час спрацьовування апарата, тривалість керуючого імпульсу для силового напівпровідникового приладу та ін.

2.2 Structure of Measuring Circuits and Their Components

In a number of cases, measurements of electrical quantities in testing of electrical and power electronic apparatus do not cause significant difficulties and can be performed directly with *standard instruments*. Such cases of measurements are widely represented in educational literature. However, experience shows that direct measurements are far from always possible. This situation frequently takes place, at first, due to the fact that the magnitudes of the measurands are either very high or very low, and hence direct measurements with standard instruments are impossible. Secondly, standard instruments possess lag effect and so measurements in transient and impulse conditions are impossible while it is frequently required and very important point.

In addition, it should be noted that as for safety requirements, especially where we deal with high voltage, measuring (recording) instruments are usually located at relatively large distance (tens to hundreds of meters) from the research object. Consequently, there is a problem to transmit the measuring signal from the object under study to the measuring (recording) instrument without distortion. Thus, the structural diagram of the measuring system of the test setup in the general case has the following form, Figure 2.1.

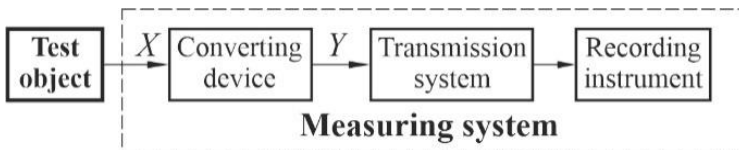


Figure 2.1 – General structure of measuring circuit

The input measuring signal X , coming from investigate object IO (that is its source), is applied to the input of converting device called usually *measuring transducer* that converts the input measuring signal into proportional value Y appropriate for direct measurements. This signal is transmitted via a *transmission system* to the input of a standard instrument named usually *recording instrument*, which represents this signal in the form that enable us directly perceive the magnitude and/or waveform of the measurand.

2.2 Структура вимірювальних пристроїв та їх елементи

У цілому ряді випадків вимірювання електричних величин при дослідженнях та випробуваннях електричних та електронних апаратів не викликають істотних ускладнень і проводяться безпосередньо стандартними вимірювальними приладами. Методи вимірювань за їх допомогою широко описані у навчальній літературі. Однак, як показала практика, безпосередні вимірювання далеко не завжди можливі. Це пов'язано, насамперед, з величинами вимірюваних параметрів. Ці величини можуть бути або дуже великими або дуже малими, тому їх вимір неможливо здійснити стандартними вимірювальними приладами. По-друге, стандартні вимірювальні прилади, як правило, мають значну інерційність, тобто не пристосовані для дослідження перехідних процесів, вимірювання імпульсних величин.

Крім того, слід зазначити, що з міркувань безпеки у високовольтних випробних установках вимірювальні (реєструвальні) прилади, як правило, розташовуються на відносно великій відстані (десятки-сотні метрів) від досліджуваного об'єкта. Отже, виникає проблема передачі вимірювального сигналу від досліджуваного об'єкту до вимірювального (реєструвального) приладу без спотворень. Таким чином, структурна схема вимірювального пристрою випробної установки у загальному випадку має наступний вигляд, рис. 2.1.



Рисунок 2.1 – Структурна схема вимірювального пристрою

Вимірювальний сигнал X від досліджуваного об'єкту ДО (тобто його джерела) надходить на вхід вимірювального перетворювача ВП, який здійснює перетворення вхідного вимірювального сигналу у більш зручний для безпосереднього вимірювання Y . Цей сигнал передається через лінію передачі і подається на вхід вимірювального (реєструвального) приладу РП. Реєструвальний прилад надає його у формі, яка дозволяє досліднику безпосередньо сприймати значення та/або часову діаграму вимірюваної величини.

Transmission system. In measuring signals, which is time-invariable or slowly time-variable, the so-called *bifilar* (i.e., two wires twisted between them) is usually used as a transmission system. In the case of measuring high frequency or high-rate changing signals, the transmission system is usually a *high-frequency cable* of coaxial shape. It consists of a core (thin copper conductor) and shell (braided wire shield), the space between them is filled with a dielectric. In certain cases for the purpose to eliminate fully disturbances and reliably shield against extraneous fields, the shell is made of corrugated metal tube.

The transmission system parameters must be matched with the parameters of the measuring signal source or recording instrument. Otherwise, when the measuring signal changes with a high rate, repetitive reflections of the propagating voltage wave will occur in the transmission line that lead to considerable distortions of the measuring signal. To mitigate the distortions generated, a *matching resistors* R_m are applied in measuring systems. There are two variants of matching. Figure 2.2a shows the matching carried out from the instrument side. Figure 2.2b shows the matching carried out from the side of the measuring signal source.

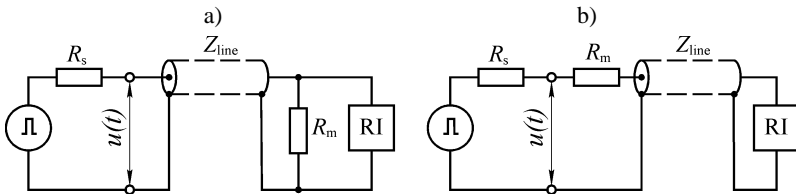


Figure 2.2 – Measuring system with matching resistor:
a) near the recording instrument; б) near the signal source

The measuring system contains measuring signal source $u(t)$ with internal resistance R_s , the transmission system (high-frequency cable) with wave impedance Z_{line} , as well as recording instrument RI. To preclude the distortions, it should be fulfilled the following equality: $R_m = Z_{line}$, under condition: $Z_{RI} \gg Z_{line}$ (for the variant shown in Figure 2.2a) or $Z_s \ll Z_{line}$ (for the variant shown in Figure 2.2b).

In present day test setups, fiber optical link including usually a transmitter, an optical cable and a receiver with an amplifier may be also used as a transmission system.

Лінія передачі. При вимірюванні постійних сигналів або сигналів, які змінюються у часі повільно лінією передачі може бути *біфіляр* (два скручених між собою провідника). При вимірюванні високочастотних сигналів або сигналів, які швидко змінюється лінія передачі частіш за все являє собою *високочастотний кабель* коаксіальної форми, що складається з жили (тонкий мідний провідник) і оболонки (дротова плетінка). У деяких випадках для повного усунення спотворень і надійного екранування від зовнішніх полів оболонка виконується гофрованою металевую трубою, простір між ними заповнено діелектриком.

Параметри лінії передачі вимірювального сигналу повинні бути узгоджені з параметрами джерела сигналу або реєструвального приладу. У протилежному випадку при швидкій зміні у часі вимірюваного сигналу буде спостерігатись багатократне відбивання хвилі на пруги, яке буде викликати значне спотворення вимірювального сигналу. Для усунення виникаючих спотворень у вимірювальних схемах застосовуються т.з. *узгоджувальні резистори*. Існує два варіанти узгодження. На рис. 2.2, а надана схема, де узгодження здійснюється на кінці лінії передачі. На рис. 2.2, б надана схема, де узгодження здійснюється на початку лінії передачі.

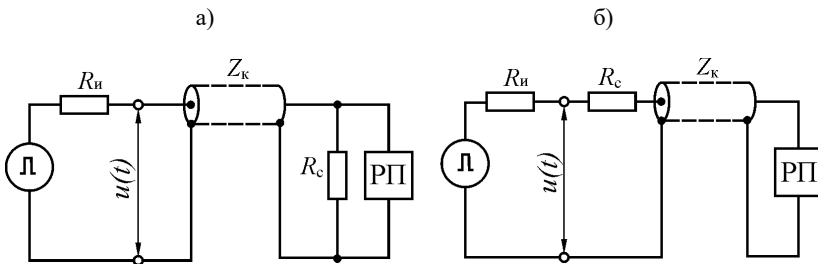


Рисунок 2.2 – Вимірювальна схема з узгоджувальними резисторами:
а) на кінці кабелю; б) на початку кабелю

Схема містить джерело вимірювального сигналу $u(t)$ з внутрішнім опором R_n , високочастотний кабель з хвильовим опором Z_k , реєструвальний прилад РП і узгоджувальний резистор R_c . Для усунення спотворень необхідно, щоб $R_c = Z_k$ при $Z_{РП} \gg Z_d$ (для схеми, що надана на рис. 2.2а) або $Z_n \ll Z_d$ (для схеми, що надана на рис. 2.2б).

У сучасних випробувальних установках лінією передачі вимірювального сигналу може бути також оптична лінія, яка зазвичай містить передавач, оптоволоконний кабель і приймач з підсилювачем.

Recording instrument is a means of measurements generating an output measuring signal in a form that enables to perceive directly the magnitude of the measurand by an observer. The recording instrument is usually a standard instrument, for example, a *digital voltmeter* (for the measurements in steady state conditions). For the measurements in transient conditions, as well as registration of impulse and high frequency signals, a *peak reading voltmeter* or *remembering oscilloscope* is usually used as the recording instrument. Now two types of remembering oscilloscopes are mainly used in test setups:

1) **Cathode-ray oscilloscopes (CRO)** (i.e., oscilloscopes with an electron-beam tube). Their operation consists in irradiating a phosphor-coated glass screen with a beam of electrons. Under the action of the plates of horizontal and vertical deflection, the electron beam moves along the screen causing fluorescence of the screen. The electron-beam tube of the remembering oscilloscope has a main cathode, which receive the signal, and one or more auxiliary cathodes producing a stream of electrons that scatter over the entire screen.

Modern CROs are mainly controlled by microprocessor devices, which enables us to calculate individual characteristics and display the values of measurand in digital form, as well as use them for recording and further analysis. Although most instruments are monochromatic, color-imaging oscilloscopes are in use more and more.

Most modern CROs are capable to receive two or more input signals and display simultaneously them. This is achieved both by splitting the main beam and by using a multi-beam electron tube. The sensitivity of cathode ray oscilloscopes ranges from a few millivolts to 100 V/cm; therefore, in measuring high-voltage, the measuring signal is usually applied to it via a measuring transducer.

2) **Digital oscilloscopes**. Their distinctive feature is the presence of an analog-to-digital converter. Its main component is a converting tube, which is a combination of two electron-beam tubes placed in one housing: one of them records and the other memorizes. Between them is a target screen consisting of a matrix of closely spaced semiconductor diodes manufactured using the same technology as integrated elements. When the recording in progress, high-energy electrons produce electron-hole pairs in the diodes, which leads to triggering the diodes irradiated.

Реєструвальний прилад являє собою вимірювальний засіб, який на виході видає сигнал у формі, що дозволяє сприймати спостерігачу безпосередньо величину вимірюваної величини. Реєструвальним пристроєм у вимірювальних пристроях, як правило, є стандартний вимірювальний прилад, наприклад, цифровий мілівольтметр, якщо вимірювання здійснюються у сталому режимі. При вимірюваннях у перехідних режимах, реєстрації імпульсних напруг і високочастотних сигналів реєструвальним приладом є, як правило, *піковий вольтметр* або *осцилограф з запам'ятовуванням*. У нинішній час у випробних установках найбільш часто використовують два основні різновиди осцилографів з запам'ятовуванням:

1) **Електронно-променеві осцилографи** (осцилографи з електронно-променевою трубкою). Їх робота заснована на принципі опромінювання покритого люмінофором скляного екрану пучком електронів. Переміщуючись по екрану під впливом пластин горизонтального і вертикального відхилення, промінь викликає флюоресценцію екрану. Електронно-променева трубка осцилографа з запам'ятовуванням має основний катод, куди надходить сигнал і один або декілька допоміжних катодів з потоком електронів, що розсіюються на весь екран.

Сучасні електронно-променеві осцилографи керуються переважно мікропроцесорними пристроями, що дозволяє розраховувати окремі характеристики і виводити у цифровій формі значення вимірюваних величин на екран і використовувати їх для запису і подальшого аналізу. Хоч більшість приладів є монохроматичними, все більш широке використання знаходять осцилографи кольорового зображення.

Більшість сучасних приладів спроможні приймати по два і більше вхідних сигналів при одночасній їх демонстрації на екрані. Це досягається як шляхом розщеплення основного променя, так і за допомогою багатопроменевої електронно-променевої трубки.

Чутливість електронно-променевих осцилографів складає від мілівольт до 100 В/см, тому при високовольтних вимірюваннях сигнал до нього, як правило, надходить через вимірювальний перетворювач.

2) **Цифрові осцилографи**. Відмінною їх рисою є наявність аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Його основним елементом є перетворювальна трубка, що представляє собою комбінацію двох електронно-променевих трубок, розміщених в одному корпусі: одна з них записує, а інша запам'ятовує. Між ними розташовується екран-мішень, що складається з матриці щільно розташованих напівпровідникових діодів, виготовлених за тієї ж технологією, що й інтегральні елементи. У процесі запису електрони з високою енергією створюють у діодах електронно-дірочні пари, що приводить до відмикання опромінених діодів.

The main advantage of digital oscilloscopes is first a higher recording speed, which is limited by the sampling frequency of the converter. The result is represented in a digital form suitable for computer processing, which enables to automatize the technique of conducting tests and correct systematic measurement errors in transmission of the signal. A digital oscilloscopes can store information for a long time in its digital memory, operate with a constant cathode ray tube refresh time, providing a bright image even at very high rate of change of the signal. Unlike an analog oscilloscope, which begins to accumulate information only after a start pulse, a digital oscilloscope can provide the pre-start operation.

Peak voltmeters are extensively used in experimental and test setups as a

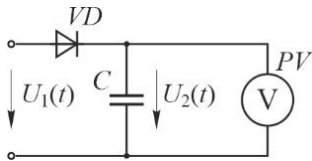


Figure 2.3 – Simplest circuit of impulse peak-voltmeter

recording instrument to measure amplitude values of AC and impulse voltages. The measurement of the voltage peak is more of interest since the occurrence of partial discharges or the breakdown is mainly governed by just this quantity. The simplest circuit to measure the impulse voltage amplitude is shown in Figure 2.3.

The main component of the peak voltmeter is a *measuring capacitor* C that is charged via a rectifier VD from a measuring signal usually outgoing from a converting device. In most cases a voltage being measured $U_1(t)$ is applied from low-voltage arm of capacitive voltage divider (see subsection 2.5). As the measured voltage decreases, the voltage across the measuring capacitor $U_2(t)$ remains practically constant. To minimize leakage and its magnitude is recorded with a convenient electrostatic voltmeter PV . The measurement of amplitude value of HVAC is made by the measurement of the current passing through the measuring capacitor, since its value is proportional to amplitude of the measured voltage. In present day HV laboratories *digital peak voltage* meters are used.

Nowadays, *digital recorders* are employed more and more in test and experimental setups. Their base is industrial computer with the advanced digital signal processing and special software tools.

Основною перевагою цифрового осцилографа є, по-перш за все, більш висока швидкість запису, яка обмежується частотою дискретизації АЦП. Результат видається в цифровій формі, придатній для комп'ютерного опрацювання, що дозволяє автоматизувати техніку проведення випробувань, скорегувати систематичні похибки вимірів при передачі сигналу. Цифровий осцилограф може необмежено довго зберігати інформацію у своїй цифровій пам'яті, працювати з постійним часом поновлення електронно-променевої трубки, забезпечуючи яскраве зображення навіть при дуже великих швидкостях сигналу. На відміну від аналогового осцилографа, який починає накопичувати інформацію лише після пускового імпульсу, цифровий здатен працювати у режимі попереднього запуску.

Пікові (амплітудні) вольтметри досить часто використовуються в експериментальних та випробувальних установках як реєструючий прилад для вимірювання амплітудних значень змінного та імпульсних напруг. Визначення амплітудного (пікового) значення напруги викликає значний інтерес, бо виникнення часткового розряду або пробій визначається саме цією величиною. Найпростіша схема пікового вольтметра для визначення амплітуди імпульсної напруги надана на рис. 2.3.

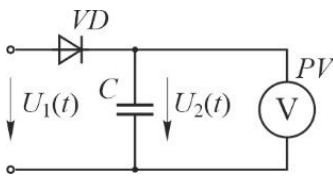


Рисунок 2.3 – Найпростіша схема імпульсного пік-вольтметра

Основним елементом пік-вольтметра є т.з. *вимірювальний конденсатор* C , який заряджається через випрямляч VD від вимірювального сигналу, який, як правило, надходить від вимірювального перетворювача. У більшості випадків вимірювана напруга $U_1(t)$ знімається з низьковольтного плеча ємнісного дільника напруги (див. підрозділ

2.5). При зниженні вимірюваної напруги напруга на вимірювальному конденсаторі $U_2(t)$ остається практично незмінною. З метою мінімізації витoku його величина фіксується вольтметром PV електростатичної системи. При вимірюванні амплітудного значення змінної синусоїдальної напруги вимірюють струм, що тече через вимірювальний конденсатор, оскільки його величина пропорційна амплітуді напруги, що вимірюється. У сучасних лабораторіях високої напруги використовують цифрові вимірювачі пікової напруги.

В останній час у випробних установках все частіше для реєстрації вимірювальних сигналів використовують *цифрові реєструвальні пристрої* на основі персональних комп'ютерів з сучасною системою цифрової обробки сигналів і відповідним програмним забезпеченням.

Digital recorders offer a number of advantages compared to analogue ones. The recorded data is available in digital form, can be evaluated automatically with a computer or with a built-in processor, and can be directly used in test reports. The use of mathematical procedures like Fourier transformations, filtering, neuronal networks, genetic algorithms, fuzzy logic, etc., allows further evaluation of the recorded data for a better judgement of the test results and for diagnostic.

A distinctive feature of digital recorders is the discreteness of recording because of that a high-frequency signal may not be recorded, which is their disadvantage. Therefore, the sampling frequency of the recorder must be much higher than the signal frequency. It should also be noted that digital recorders require careful shielding from electromagnetic interference.

A simplified block diagram of a digital recorder is shown in Figure 2.4 [20].

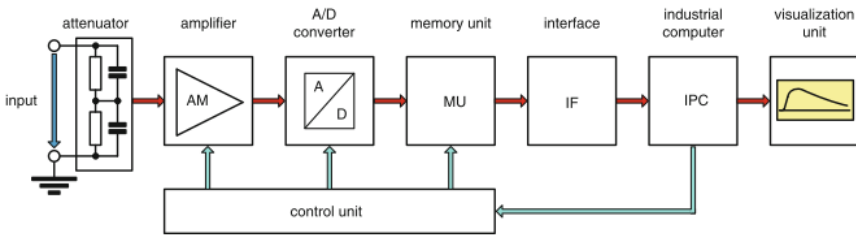


Figure 2.4 – Simplified block diagram of a digital recorder

A voltage attenuator (divider) is installed at the input of the recorder, which reduces the voltage to the level normally used in a digital instrument (usually 2 V). This is followed by a low-noise amplifier, an analog-to-digital converter, a memory unit, and an industrial computer. A control unit (micro-controller) serves for the adjustment of the input sensitivity as well as for controlling the various units for signal processing, acquisition and data storage. The industrial computer runs with a specific software package capable for both the acquisition of the stored raw data and the visualization of the time-dependent input signal.

Цифрові реєструвальні пристрої мають низку переваг у порівнянні з аналоговими системами. Результати вимірювань надаються у цифровому вигляді і оброблюються автоматично за допомогою комп'ютера або вбудованого процесора і можуть безпосередньо використовуватись у протоколах випробувань. Використання математичного апарата, зокрема перетворення Фур'є, фільтрація, нейронні мережі, генетичні алгоритми, нечітка логіка і т. д., дозволяє проводити більш точну оцінку результатів випробувань та діагностики.

Відмінною особливістю цифрових пристроїв є дискретність вимірювань, внаслідок чого високочастотний сигнал може бути не зареєстрований, що є їх недоліком. Тому частота дискретизації пристрою повинна бути значно вищою за частоту сигналу. Слід також зазначити, що цифрові реєструвальні пристрої потребують ретельного екранування від електромагнітних перешкод.

На рис. 2.4. наданий один з варіантів блок-схеми цифрового реєструвального пристрою [20].

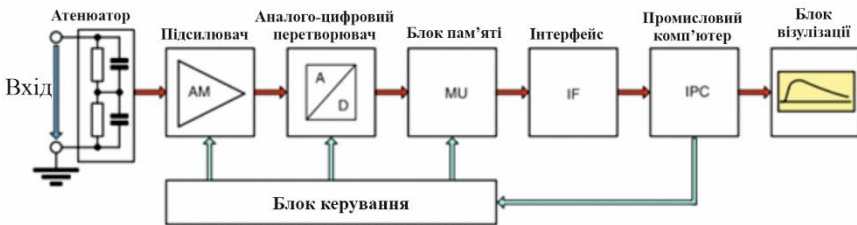


Рисунок 2.4 – Спрощена блок-схема цифрового реєструючого пристрою

На вході пристрою встановлено атенюатор (дільник) напруги, який знижує напругу до рівня, яке використовується у цифрових пристроях (за звичаєм 2 В). Далі йдуть малопотужний підсилювач, аналого-цифровий перетворювач, блок пам'яті та промисловий комп'ютер. Блок керування (мікроконтролер) слугує для регулювання вхідної чутливості, а також для керування різними блоками обробки сигналів, збирання та зберігання даних. Промисловий комп'ютер працює зі спеціальним програмним пакетом, що забезпечує збирання даних, а також візуалізацію часових діаграм вхідного сигналу.

2.3 Measuring Transducers: Classification and Basic Performances

A *measuring transducer* is a mean of measurements intended to convert an input measuring signal (i.e., the value being measured) into an output signal convenient for further conversion, transmission, computer processing or storage, but unsuitable for direct perception by an observer.

In general, a measuring transducer, like any other measuring facility, can consist of several converting components. Each of them transforms the measuring signal. The converting component, which directly perceives the measured value, is a sensitive component usually called *sensor*.

As differentiated from a converting component, a transducer, as a mean of measurements, is usually made as an individual independent unit having specific metrological performances (accuracy rating, etc.). Along with the term measuring transducer, the term sensor has become widely used. However, these two terms should not be equated. A sensor is usually called a constructively completed device, which for measurements is placed directly in the zone of the object under investigation, and performs the function of a measuring transducer.

Nowadays, there are many types of transducers; they have different principles of operation and applications. It should be noted that a generally accepted classification of transducers has not been developed to date. There are several individual approaches to their classification, which have both advantages and disadvantages.

Transducers are first distinguished according to the type of input and output quantities. From this standpoint, there are transducers that convert:

- *electrical quantity into electrical one*, when both the input and output quantities are electrical quantities; such transducers convert either the magnitude of an electrical parameter (instrument transformers, voltage dividers etc.), or an electrical quantity of one type into an electrical quantity of another type (shunts, additional resistors, etc.);

- *non-electrical quantity into non-electrical one*: such transducers also can be converters of the magnitude of one or another parameter (levers, gears etc.) or converters of the input quantity type (cantilevers, membranes, springs etc.);

2.3 Вимірювальні перетворювачі: класифікація, основні характеристики

Вимірювальний перетворювач (ВП) – це засіб вимірювань, призначений для перетворення вхідного вимірювального сигналу (вимірюваної величини) у вихідний сигнал, більш зручний для подальшого перетворення, передачі, комп'ютерної обробки або зберігання, але непридатний для безпосереднього сприйняття спостерігачем.

У загальному випадку ВП, як і будь-який інший засіб вимірювань, може складатись з декількох *перетворювальних елементів*, у кожному з яких відбувається одне з послідовних перетворень вимірювального сигналу. Перетворювальний елемент, який безпосередньо сприймає вимірювану величину є *чутливим елементом*.

На відміну від перетворювального елемента, ВП як засіб вимірювань має нормовані метрологічні характеристики і виконується за звичаєм у вигляді окремого незалежного пристрою певного класу точності. Поряд з терміном *вимірювальний перетворювач*, широке розповсюдження набув термін *датчик*. Проте, не слід ототожнювати ці два терміни. Датчиком за звичаєм називають конструктивно завершений пристрій, який розміщується в процесі вимірювань безпосередньо в зоні досліджуваного об'єкта, і виконує функцію вимірювального перетворювача.

У наш час існує багато різновидів ВП, вони мають різний принцип дії і призначення. Слід зазначити, що до сьогодні загальноприйнята класифікація ВП не розроблена. Існує декілька індивідуальних підходів до класифікації ВП, які мають як позитивні, так і негативні сторони.

В залежності від роду вхідної і вихідної величин ВП підрозділяють на такі групи, що відповідно здійснюють перетворення:

– *електричних величин в електричні*, в яких вхідними і вихідними величинами є електричні величини; такі ВП здійснюють перетворення розміру певної електричної величини (вимірювальні трансформатори, дільники струму і напруги), або електричної величини одного виду у величину іншого виду (шунти, додаткові опори).

– *неелектричних величин в неелектричні*, в яких вхідні і вихідні величини є неелектричними; вони також можуть бути перетворювачами розміру тої чи іншої неелектричної величини (важелі, редуктори) або виду вхідної величини (консоли, мембрани, пружини та інші пружні механічні перетворювачі).

- *electrical quantity into non-electrical one*: the main group of these transducers is referred to measuring mechanisms of direct conversion electromechanical devices, where input electrical quantity is converted into the travel of the indicator (pointer); another group is referred to the so-called reverse converters used in the feedback circuits of complex transducers;

- *non-electrical quantity into electrical one*: this variation of transducers is the most numerous and various; this is explained, from the one hand, by the multiplicity of non-electrical quantities and, from other hand, by the advantages of electrical measurement methods and, correspondingly, by the necessity to convert non-electrical quantities just into electrical ones.

According on the type of transformation function, measuring transducers are shared into three big groups. The so-called *scale transducers* refer the first group, changing the magnitude of input quantity by a certain number of times with no change its physical nature. The second group is referred by the so-called *functional transducers*, carrying out a single-valued functional conversion of the input quantity with or no change its physical nature. The third group is the so-called *operational transducers*, executing with the input value mathematical operations of a high order, such as differentiation or integration over time.

Measuring transducers are also distinguished according to the output signal type; there are generating and parametrical transducers. The output signal of the *generating transducer* possesses energetic properties; in particular, such signal may be electromotive force, electric current, mechanical force, pressure, etc. *Parametrical transducer* is a one, in which a change in the input signal leads to a change in its certain parameter, such as resistance, capacitance, inductance, elasticity, etc. In this case, to obtain the output energetic signal, it is necessary to have supply source.

There is also a classification of transducers according to the physical phenomena used for their functioning. Taking their wide variety into account, let us consider the only main groups of transducers that are most extensively used for testing and experimental research of electric and power electronic apparatus.

Mechanical elastic transducers: their principle of operation is based on the dependence between input mechanic forces and output travels or mechanic stresses defined by the elastic properties of the material used for the transducer.

– *електричних величин в неелектричні*: основну групу цих перетворювачів складають вимірювальні механізми електромеханічних приладів безпосереднього перетворення, в яких вхідна електрична величина перетворюється у переміщення покажчика. Другу велику групу складають так звані зворотні перетворювачі, що використовуються у колах зворотного зв'язку складних ВП неелектричних величин зрівноважувального перетворення.

– *неелектричних величин в електричні*, які представляють собою чисельнішу й різноманітну групу ВП. Це пояснюється, з одного боку, чисельністю самих неелектричних величин і, з іншого – перевагами електричних методів вимірювань і, відповідно, необхідністю перетворення неелектричних величин саме у електричні.

По виду функції перетворення ВП розділяють на три групи: *масштабні*, що змінюють у визначене число раз розмір вхідної величини без зміни її фізичної природи, *функціональні*, які здійснюють однозначне функціональне перетворення вхідної величини зі зміною її фізичної природи або без її зміни, і *операційні*, які виконують над вхідною величиною математичні операції вищого порядку – диференціювання або інтегрування за часовим параметром.

В залежності від виду вихідного сигналу, розрізняють *генераторні* й *параметричні* ВП. Генераторними є ВП, вихідні сигнали яких мають енергетичні властивості, якими зокрема можуть бути е.р.с., електричний струм, механічна сила, тиск і т. п. Параметричними є ВП, в яких зміна вхідного сигналу призводить до зміни їх певних параметрів – опору, ємності, індуктивності, пружності та ін. Для здобуття вихідного енергетичного сигналу в цих випадках потребуються додаткові джерела енергії.

Існує також класифікація вимірювальних перетворювачів в залежності від фізичних принципів їх функціонування. Враховуючи їх велике різноманіття розглянемо лише основні групи вимірювальних перетворювачів, які найчастіше використовуються при випробуваннях та експериментальних дослідженнях електричних та електронних апаратів.

Механічні пружні перетворювачі: основу їх принципу дії складають залежності між вхідними механічними силами та вихідними переміщеннями або механічними напруженостями, які визначаються пружними властивостями матеріалу перетворювача.

Resistive electrical and mechanical-electrical transducers: the carrier of measuring information in resistive transducers is electric resistance. The principle of conversion in this case is based on the dependence between voltage, current and electrical resistance defined by Ohm's law. The operational principle of resistive mechanic-electrical transducers is based on the change in electrical resistance under the action of the input mechanical quantity being converted.

Electro-static transducers: the carrier of the measuring information in such transducers is an electric charge. There are two main variations of electrostatic converters, capacitive and piezoelectric. The operation of *capacitive transducers* is based on the interaction of two charged bodies. *Piezoelectric transducers* function due to appearance of electric charge caused by the action of mechanic forces, temperature changing or other factors.

Electro-mechanical transducers: their principle of operation consists in travel of the movable components under the action of electric current. Electrodynamic, ferrodynamic and magnetolectric converters refer this type of transducers.

Electromagnetic transducers: it is great and various group of transducers in terms of principle of operation and purpose. They are united by the common theory and principle of conversion based on the use of electromagnetic phenomena. It is, first, scale electromagnetic transducers of electrical voltage and current, such as instrument transformers, inductive dividers and so forth, and secondly, induction (transformer and autotransformer) converters of mechanical quantities.

Galvanomagnetic transducers: their principle of operation is based on the use of galvanomagnetic effects consisting in changing the electric quantities of the converters under the action of the magnetic field being converted, in particular, in changing electric resistance (Gaussian effect) or the generation of electromotive force (*Hall Effect*). Accordingly, the main variations of galvanomagnetic transducers are *magneto-resistive* transducers and *Hall generator* or *Hall sensor*.

Induction transducers: the principle of operation of such transducers is based on the Faraday's law of induction. The input quantities in this case can be the rate of change of the magnetic flux or speed of mechanical linear or angular travel of the sensing coil.

Резистивні електричні і механо-електричні перетворювачі: переносником вимірювальної інформації в резистивних перетворювачах є електричний опір. В основі принципу перетворення електричних резистивних перетворювачів полягає залежність між напругою, струмом і електричним опором, яка визначається законом Ома. Принцип дії механо-електричних резистивних перетворювачів полягає у зміні електричного опору під дією вхідної перетворюваної механічної величини.

Електростатичні перетворювачі: до даної групи належать перетворювачі, переносником вимірювальної інформації в яких є електричний заряд. Розрізняють два основних різновиду електростатичних перетворювачів: *емнісні*, принцип дії яких полягає у взаємодії двох заряджених тіл, і *ізоелектричні*, виникнення електричного заряду в яких є наслідком дії на чутливий елемент механічних зусиль, зміна температури або інших факторів.

Електромеханічні перетворювачі: до них належать перетворювачі, принцип дії яких полягає у виникненні механічних переміщень їх рухомих елементів під впливом електричного струму. Це електродинамічні, феродинамічні і магнітоелектричні перетворювачі.

Гальваномагнітні перетворювачі: принцип дії цих перетворювачів полягає у використанні гальваномагнітних ефектів, сутність яких полягає у зміні електричних параметрів перетворювачів під впливом перетворюваного магнітного поля, зокрема у зміні електричного опору (ефект Гауса) або з'явленні е.р.с. (ефект Холла). Основними різновидами гальваномагнітних перетворювачів є відповідно магніторезистивні перетворювачі і перетворювачі Холла.

Електромагнітні перетворювачі складають велику і різноманітну за принципом дії і за призначенням групу ВП, об'єднаних спільністю теорії та принципу перетворення, заснованого на використанні електромагнітних явищ. Це масштабні електромагнітні перетворювачі електричної напруги і струму (вимірювальні трансформатори, індуктивні дільники) і функціональні індуктивні (трансформаторні й автотрансформаторні) перетворювачі механічних величин.

Індукційні перетворювачі: принцип дії таких ВП заснований на законі електромагнітної індукції. Вхідними величинами в них можуть бути швидкість зміни магнітного потоку або швидкість механічного лінійного або кутового переміщення вимірювальної котушки.

Thermal transducers: the basis of their principle of operation is the use of physical mechanisms defined by thermal phenomena. The basic variations of thermal transducers are as follows: *thermo-mechanical*, *thermo-resistive* and *thermo-electric*, which are mainly temperature converters, but they are indirectly used for other non-electric quantities that are evident through thermal phenomena and functionally associated with thermal quantities.

Optical transducers: their principle of operation consists in the conversion of the optical (lighting and thermal) radiation flux. The measuring information in this case converted by the way of modulating the radiative source parameters or the optical channel. The functional possibilities and application area of optical transducers significantly extended due to achievements of optoelectronic and fiber-optic technologies.

It should be noted that there exists many other types of measuring transducers. With the development of science and technology, they are continuously improved and new types of transducers are created.

Main characteristics of transducers. In static conditions, i.e. at steady state (time-invariable) values of the input and output quantities, the transfer properties of the transducers are featured by the following basic parameters.

Function of transfer or **transformation** describes the dependence between input X and output Y quantities of the transducer:

$$Y = F(X), \quad (2.1)$$

where X and Y are real (averaged) magnitudes of the input and output quantities, respectively.

This function for the transducer can be determined for its different operating duties at certain points of the conversion range, both in normal circumstances and under the action of external factors agreed by the specifications. The function of transfer assigned to given transducer type is the *nominal (certificate) function of transfer* or its *calibrating characteristic*. It can be written analytically represented graphically or tabulated.

Ratio of transfer or **conversion** is the relation of the output value to the input one:

$$k(X) = \frac{F(X)}{X} \quad (2.2).$$

Теплові перетворювачі: їх принцип роботи полягає у фізичних закономірностях, які визначаються тепловими процесами. Основними різновидами теплових перетворювачів є термомеханічні, терморезистивні та термоелектричні перетворювачі. Теплові перетворювачі – це переважно перетворювачі температури, проте опосередковано використовуються для вимірювання інших неелектричних величин, які проявляються через теплові явища і функціонально пов'язаних з ними тепловими величинами.

Оптичні перетворювачі: їх принцип дії полягає у перетворенні потоку оптичного (світлового та теплового) випромінювання. Таке перетворення здійснюється за звичаєм модуляцією параметрів джерела випромінювання або оптичного каналу. Функціональні можливості оптичних перетворювачів та область їх використання значно поширились у зв'язку з досягненнями оптоелектронної та оптоволоконної техніки.

Слід зазначити, що існує багато інших видів ВП. З розвитком науки і техніки має місце подальше їх удосконалення, виникають нові їх види.

Основні характеристики ВП. У статичному режимі, тобто при сталих (таких, що не змінюються у часі) значеннях вхідної та вихідної величинах, передаточні властивості ВП характеризуються наступними основними параметрами:

Функція передачі (перетворення): описує зв'язок між вхідною X та вихідною Y величинами ВП:

$$Y = F(X), \quad (2.1)$$

де Y і X – дійсні (усереднені) значення вхідної і вихідної величини, відповідно.

Визначення цієї функції для ВП може бути здійснено у різних режимах їх роботи у певних точках діапазону перетворення, як у нормальних умовах, так і при дії зовнішніх факторів, застережених у нормативних документах. Присвоєна даному ВП функція передачі (перетворення) є *номінальною (паспортною) функцією перетворення* або *градуювальною характеристикою*. Вона може бути записана аналітично, а також надана у вигляді таблиці або графіка.

Коефіцієнт (передачі) перетворення: являє собою відношення вихідної величини Y до вхідної величини X , тобто

$$k(X) = \frac{F(X)}{X}. \quad (2.2)$$

The nominal ratio of conversion is determined according to the nominal conversion function:

$$k_{\text{nom}}(X) = \frac{F_{\text{nom}}(X)}{X}.$$

If the function of transfer is linear and its graphic curve passes through the origin of the coordinate system, then $k_{\text{nom}}(X) = \text{const}$.

Sensitivity is the derivative on the function of transfer:

$$S = \frac{dY}{dX} = F'_{\text{nom}}(X), \quad (2.3)$$

or in finite increments: $S = \frac{\Delta Y}{\Delta X}$.

Sensitivity characterizes the degree of response of the transducer to the input value. The transducers, which possess linear function of transfer, have constant sensitivity. If, besides, the output-input curve passes through the origin of the coordinate system, then the nominal sensitivity will be equal to the nominal ratio of transfer. If the function of transfer is non-linear, then the sensitivity is a function of the input quantity.

There is also the notion of *relative sensitivity* that is the relation of the relative change in the input quantity to the relative change in the output quantity:

$$S_{\text{relat}} = \frac{\Delta Y/Y}{\Delta X/X}. \quad (2.4)$$

Threshold of sensitivity or response is usually said as the lowest magnitude of the input quantity, which can be reliably detected by the transducer. However, such definition has no clear quantitative content. To understand the essence of the notion of the sensitivity threshold, it should keep in mind that the so-called *zero error* Δ_0 does not enable to detect reliably the small magnitudes of input quantity. Zero error behaves usually as random value and manifests itself as interferences and noises, causing corresponding changes in the output quantity. Therefore, threshold of response for a transducer should be understood the value of input magnitude: $X = \Delta_0$.

Errors: The errors of the transducers, as well as errors of their individual components, can be classified according to different signs. In particular, according to the manner of expression, the transducer errors are subdivided into absolute, relative and reduced. Since, in general case, the ratio of conversion of a transducer not equals one (as it take place in instrument devices), so the errors of transducers can be reduced to an input or output quantity.

Номинальний коефіцієнт перетворення визначається по номінальній функції перетворення:

$$k_{\text{ном}}(X) = \frac{F_{\text{ном}}(X)}{X}.$$

Якщо функція перетворення лінійна і її графік проходить через початок системи координат, то $k_{\text{ном}}(X) = \text{const}$.

Чутливість являє собою похідну від функції перетворення:

$$S = \frac{dY}{dX} = F'_{\text{ном}}(X), \quad (2.3)$$

або у кінцевих прирощеннях: $S = \frac{\Delta Y}{\Delta X}$.

Чутливість характеризує ступінь реагування ВП на вхідну величину. Для ВП, які мають лінійну функцію передачі, чутливість буде постійною. Якщо, окрім цього, графік функції $F(X)$ проходить через початок системи координат, то номінальна чутливість буде дорівнювати номінальному коефіцієнту перетворення. Якщо ж функція перетворення нелінійна, то чутливість є функцією вхідної величини.

Існує також поняття *відносна чутливість*, яка являє собою відношення відносної зміни вихідної величини до відносної зміни вхідної величини:

$$S_{\text{відн}} = \frac{\Delta Y/Y}{\Delta X/X}. \quad (2.4)$$

Поріг чутливості: під порогом чутливості ВП за звичаєм розуміють найменше значення вхідної величини, яке може бути упевнено виявлено цим перетворювачем. Таке визначення не має, однак, чіткого кількісного змісту. Для розуміння суттєвості поняття порога чутливості слід мати на увазі, що виявляти упевнено малі значення вхідної величини заважає т. з. *похибка нуля* Δ_0 , яка носить випадковий характер і проявляється у вигляді перешкод та шумів, які викликають відповідні зміни вихідної величини. Отже, під порогом чутливості ВП слід розуміти значення вхідної величини $X = \Delta_0$.

Похибки: похибки ВП, як і похибки окремих її елементів, можуть бути класифіковані за різними ознаками. Зокрема, за способом виразу похибки ВП підрозділяють на абсолютні, відносні та приведені. Оскільки у загальному випадку коефіцієнт перетворення ВП не дорівнює одиниці (як це має місце у вимірювальних приладах), то похибки ВП можуть бути приведені до вихідної або вхідної величини:

Thus, *absolute errors* relative to output and input, respectively, are expressed as follows:

$$\Delta_{\text{out}} = Y - F_{\text{nom}}(X); \quad \Delta_{\text{in}} = \frac{Y}{k_{\text{nom}}} - X, \quad (2.5)$$

where k_{nom} is the nominal ratio of conversion of the transducer corresponding to its calibration characteristic.

Relative or fractional errors of a transducer relative to output and input, respectively:

$$\Delta_{\text{out}} = \frac{\Delta_{\text{out}}}{Y}; \quad \delta_{\text{in}} = \frac{\Delta_{\text{in}}}{X}, \quad (2.6)$$

Reduced or conventional errors:

$$\gamma_{\text{out}} = \frac{\Delta_{\text{out}}}{y_N}; \quad \gamma_{\text{in}} = \frac{\Delta_{\text{in}}}{x_N}, \quad (2.7)$$

where x_N , y_N are the so-called *normalizing quantities* on output and input, respectively; the conversion range is usually accepted as normalizing quantity.

Errors are also classified according to degree of uncertainty. By this indication, it is distinguished systematic and random errors. *Systematic or constant error* is the component of the transducer error, which is invariable in magnitude under repetitive conversions of the quantity with the same magnitude. *Random or accidental error* is the component, which is randomly variable under repetitive conversions of the quantity with the same magnitude.

There are also such types of errors as basic and complementary. *Basic or fundamental error* is the one inherent to the transducer operating in normal circumstances, i.e. under conditions, when influencing quantities, such as temperature, frequency etc., are normal in magnitudes or in the limits of normal magnitude range. *Complementary error* is the one caused by the one of influencing quantities deviating from normal magnitude or is beyond the normal range. The permissible deviation range of the operating conditions for the transducers is also specified and limited by the operating range of magnitudes of the influencing quantity that must be correspond to normalized complementary error.

A specific variation of error taking place in discrete transducers is the so-called *quantization error*.

In dynamic conditions, i.e. when the input and output quantities are time-variable, the transfer properties of the transducers are featured by the following basic parameters.

Таким чином, *абсолютні похибки* по виходу та входу, відповідно визначаються наступними виразами:

$$\Delta_{\text{вих}} = Y - F_{\text{ном}}(X); \quad \Delta_{\text{вх}} = \frac{Y}{\kappa_{\text{ном}}} - X \quad (2.5)$$

де $\kappa_{\text{ном}}$ – номінальний коефіцієнт перетворення ВП, що відповідає його градуовальній характеристиці;

Відносні похибки ВП по виходу і по входу, відповідно:

$$\delta_{\text{вих}} = \frac{\Delta_{\text{вих}}}{Y}; \quad \delta_{\text{вх}} = \frac{\Delta_{\text{вх}}}{X}; \quad (2.6)$$

Приведені похибки:

$$\gamma_{\text{вих}} = \frac{\Delta_{\text{вих}}}{y_N}; \quad \gamma_{\text{вх}} = \frac{\Delta_{\text{вх}}}{x_N}, \quad (2.7)$$

де x_N, y_N – т.з. *нормовані значення* по входу або по виходу, відповідно, в якості яких за звичаєм приймається діапазон перетворень.

В залежності від ступеню невизначеності похибки підрозділяють на систематичні та випадкові. *Систематичною похибкою* називають складову похибки ВП, значення якої при повторних перетвореннях величини з незмінним розміром залишається постійним. *Випадковою похибкою* називають ту її складову, значення якої при повторних перетвореннях величини з незмінним розміром змінюється випадково.

Існують також *основна похибка*, властива ВП при нормальних умовах його використання (тобто в умовах, коли впливові величини: температура, частота і т. п. мають нормальні значення або знаходяться у межах нормальної області їх значень) і *додаткова похибка*, викликана відхиленням однієї з впливових величин від нормального значення або виходом її значення за межі нормальної області. Межі допустимих відхилень умов роботи перетворювачів від нормальних також нормуються і обмежуються робочою областю значень впливової величини, у межах якої нормується додаткова похибка.

Специфічним різновидом похибки, що виникає у дискретних перетворювачах, є т.з. *похибка квантування*.

У динамічному режимі, тобто вхідній та вихідній величинах, що змінюються у часі, передаточні властивості ВП характеризуються наступними основними параметрами.

Transfer function is the following relation:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)}, \quad (2.8)$$

where $Y(p)$ and $X(p)$ are the Laplace representations of the output and input quantities, respectively.

The transfer function is a comprehensive characteristic of the dynamic properties of the transducer. However, it should be pointed out that transfer function is little representative and, in addition, there is difficult problem to determine experimentally it. Therefore, in practical engineering other characteristics are used. In particular, it is response of the transducer to an excitation in the form of a *unit step* (or short impulse of a unit area), a steady-state response to a *linearly rising input excitation* or a *sine excitation*. Let us consider these characteristics.

The response of an unexcited (with zero initial conditions) transducer to a unit step excitation is called the *transient function*. The most typical transient functions are *aperiodic (smoothing of front)*, shown in Figure 2.5a, and *oscillating (over-swings or over-shoots)*, shown in Figure 2.5b. Typical example of a unit step exposure of an input signal is transition of a transducer or other object from a medium with one temperature into a medium with another temperature.

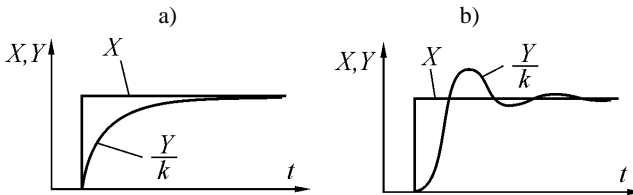


Figure 2.5 – Typical transient functions: a) aperiodic; b) oscillating

The steady state response to a sinusoidal input action in the general case is a complex function of the parameters of the measuring transducer and is described by the so-called *frequency characteristics*:

- *amplitude response*: $Y = f_1(\omega)$ or $k = f_1(\omega)$ and
- *phase response*: $\varphi = f_2(\omega)$, where ω is the frequency of input signal; φ is the phase angle between the input and output quantities.

Передаточна функція являє собою відношення:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)}, \quad (2.8)$$

де $Y(p)$ – зображення (по Лапласу) вихідної величини; $X(p)$ – зображення (по Лапласу) вхідної величини.

Передаточна функція $W(p)$ є вичерпною характеристикою динамічних властивостей ВП. Проте, слід відзначити, що вона мало наглядна і, крім того, трудно піддається експериментальному визначенню. Тому на практиці більш використовують інші характеристики. Одною з них є *реакція ВП на дію одиничного скачка* (короткого імпульсу одиничної площі), *стала реакція на лінійно нарощувану вхідну дію* або *на синусоїдальну дію*.

Реакція незбудженого (с нульовими початковими умовами) ВП на дію у вигляді одиничного скачка називається *перехідною функцією*. Найбільш характерними перехідними функціями (формами реакції) є *аперіодична* (згладжування фронту), рис. 2.5а, та *коливальна* (викиди напруги), рис. 2.5б. Прикладом стрибкоподібної дії вхідного сигналу може бути перехід з середовища з однією температурою у середовище з іншою температурою.

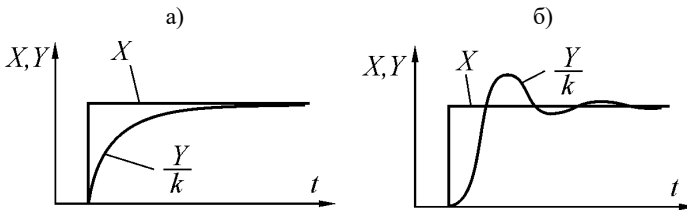


Рисунок 2.5 – Реакції на дію одиничного скачка: а) аперіодична; б) коливальна

Стала реакція на синусоїдальну вхідну дію у загальному випадку є складною функцією параметрів ВП і описується т.з. *частотними характеристиками*:

- амплітудно-частотною $Y = f_1(\omega)$ або $k = f_1(\omega)$;
- фазочастотною $\varphi = f_2(\omega)$, де ω – частота вхідного сигналу; φ – кут зсуву фаз між вхідною X та вихідною Y величинами.

2.4 Voltage measurements

As already noted, in the course of testing electrical and power electronic apparatuses, there is necessity to measure the voltages that are different not only in magnitude, but in a number of other parameters. Low voltages (below 1000 V) are usually measured by direct connection of the recording instrument (mostly oscilloscope) to the object being investigated. The measurements of high voltages in test set-ups are usually taken with two measuring system types.

The measuring systems allowing direct voltage measurements refer to the first type. This type of measuring systems is based on use of such devices as electrostatic and rotating voltmeters, sphere gaps, klydonographs (surge voltage recorders) etc. The second type of measuring systems (where indirect measurements are performed) is those in which converting devices (measuring transducers) are applied (see Figure 2.1). For voltage measurements, the following types of transducers are used: inductive and capacitive voltage transformers, series impedances, measuring capacitors, voltage dividers etc. Let us consider the main measuring systems and transducers that are most extensively used for voltage measurements in research and testing electrical and power electronic apparatus.

Electrostatic voltmeters are extensively used for direct measurements of high voltages of power frequency or rectified voltages. The general principle of their operation consists in the travel of the movable component that undergo the action of the electrostatic field forces in compliance with Coulomb's law. The interaction force of two conductors in the direction of coordinate x having potential difference U is determined by the following expression:

$$f_x = \left| \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{CU^2}{2} \right) \right|, \quad (2.9)$$

where C is the capacitance of the system.

If the voltage U is not dependent on the coordinate x , then the force will be determined as follows

$$f_x = \left| \frac{U^2}{2} \frac{\partial C}{\partial x} \right|. \quad (2.10)$$

2.4 Вимірювання напруг

Як зазначалось, в процесі досліджень та випробувань електричних та електронних апаратів дуже часто доводиться вимірювати напруги, що суттєво відрізняються не тільки за величиною, але і ряду інших параметрів. Вимірювання низьких напруг (до 1000 В) здійснюється, як правило, безпосереднім підключенням реєструвального приладу (осцилографа) до досліджуваного об'єкту. При вимірюванні високих напруг застосовують два типи вимірювальних пристроїв.

Перший – це вимірювальні пристрої, які дозволяють безпосередньо визначити вимірювану напругу. До даного типу пристроїв відносять електростатичні та роторні вольтметри, вимірювальні розрядники, клідонографи та ін. До другого типу відносять вимірювальні пристрої, в яких використовуються вимірювальні перетворювачі (див. рис. 2.1). Основними типами вимірювальних перетворювачів для вимірювання напруги є вимірювальні конденсатори, дільники напруги, індуктивні та ємнісні трансформатори напруги, додаткові опори і т. д. Розглянемо основні вимірювальні пристрої, що найбільш часто застосовують для вимірювання напруг при дослідженнях та випробуваннях електричних та електронних апаратів.

Електростатичні вольтметри широко використовуються для прямого вимірювання високої напруги промислової частоти або випрямленої напруги. Загальним принципом їх дії є переміщення рухомої частини під дією механічних сил електричного поля відповідно до закону Кулона. Сила взаємодії двох провідників у напрямку x , які знаходяться під різністю потенціалів U , визначається за таким співвідношенням

$$f_x = \left| \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{CU^2}{2} \right) \right|, \quad (2.9)$$

де C – ємність системи.

Якщо напруга U не залежить від координати x , то сила буде визначатись за наступним виразом:

$$f_x = \left| \frac{U^2}{2} \frac{\partial C}{\partial x} \right|. \quad (2.10)$$

Accordingly, the magnitude of the voltage U is determined by the measurement of the force f_x between the electrodes. In the process, the geometrical parameters of the system that enable to determine the magnitude of $\partial C/\partial x$ must be known. As a rule, one of the electrodes of an electrostatic voltmeter is rigidly fixed, whereas the other is allowed to move a small distance (a fraction of a millimeter to a few millimeters), otherwise the value of $\partial C/\partial x$ can change significantly and affect the measurement results. Since the force is proportional to the square of U , the electrostatic voltmeter can be used to measure both DC and rms of AC voltages, but the instrument's scale is non-linear.

An essential feature of electrostatic voltmeters is a high input resistance, since their capacitance is from 5 to 50 pF, and the leakage resistance can be as high as 10^{13} Ohms. Therefore, the instruments practically do not affect the measured circuit, which is their important advantage, especially when measuring DC voltage and electrostatic charges [46].

There are exist two variations of electrostatic voltmeters. It is firstly *absolute voltmeters*, in which the interaction forces are measured at a fixed distance between the electrodes, and secondly, *relative* or *conventional voltmeters*, in which the measure of the voltage to be measured is the shift of the movable electrode relative to the fixed one. It should be noted that in technical voltmeters, not the whole electrode carries out the travel, but only its small plate located in the round cutout of one of the electrodes. The electrostatic interaction force between the electrodes in this case is balanced by the elastic forces of springs, the gravitational forces of weights etc. The scale of these instruments is calibrated with the help of reference instruments and devices.

Figure 2.6 shows the simplest schematic diagram of an electrostatic voltmeter, the so-called *Abraham voltmeter*, which, however, is the most commonly used meter in test setups.

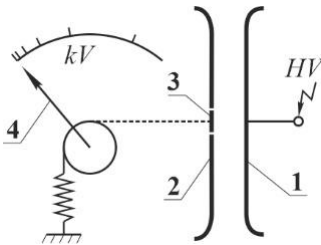


Figure 2.6 – Schematic diagram of the Abraham electrostatic voltmeter

The main components of the voltmeter are two hollow metal electrodes that produce an almost uniform electric field under applied a measured high voltage between them. Electrode 1 is at high potential, while grounded electrode 2 in the central part has a hole in which a small movable disk 3 is arranged and is geared to pointer 4 of the instrument.

Отже, величина напруги U може бути визначена вимірюванням сили f_x між електродами. При цьому повинні бути відомі геометричні параметри системи, які дозволяють визначити значення $\partial C/\partial x$. Як правило, один з електродів електростатичного вольтметра жорстко закріплений, а інший може переміщуватись на невелику відстань (частки або одиниці міліметра), в протилежному випадку величина $\partial C/\partial x$ може істотно змінитися і вплинути на результати вимірювань. Оскільки сила пропорційна квадрату U , електростатичний вольтметр може бути використаний для вимірювання як постійної, так і діючого значення змінної напруги, але шкала приладу нелінійна.

Суттєвою особливістю електростатичних вольтметрів є великий вхідний опір, оскільки їх ємність складає від 5 до 50 пФ, а опір витoku може складати до 10^{13} Ом. Отже прилади практично не чинять впливу на вимірюване коло, що є важливою їх перевагою, особливо при вимірюванні постійної напруги та електростатичних зарядів [46].

Існують два типи електростатичних вольтметрів. Це, по-перше, *абсолютні вольтметри*, в яких електростатичні сили вимірюються при незмінній відстані між електродами, і, по-друге, *технічні вольтметри*, в яких мірою вимірюваної напруги є величина зміщення рухомого електрода відносно нерухомого. Слід відзначити, що в технічних вольтметрах переміщується не весь електрод, а лише невелика пластинка, яка знаходиться у круглому вирізі одного з електродів. Сили електростатичної взаємодії між електродами урівноважується пружними силами пружин, силою тяжкості важелів і т. п. Шкала цих приладів градується за допомогою еталонних приладів та пристроїв.

На рис. 2.6 надана найпростіша схема електростатичного вольтметра, т. з. *вольтметр Абрахама*, який, однак, найбільш часто використовується у випробних установках.

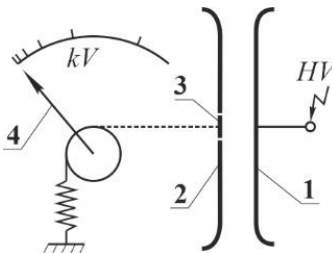


Рисунок 2.6 – Схема електростатичного вольтметра Абрахама

Основними елементами вольтметра є два порожністі металеві електроди, які утворюють практично рівномірне електричне поле за наявності між ними вимірюваної високої напруги. Електрод 1 знаходиться під високим потенціалом, а заземлений електрод 2 в центральній частині має отвір, в якому встановлено невеликий рухомий диск 3, пов'язаний зі стрілкою вимірювального приладу 4.

Under the action of the electric field, the disc moves and turns the pointer of the instrument. The measurement range of the voltmeter depends on the distance between the electrodes and is usually from 3 to 500 kV [22].

Rotating (generating) voltmeters. The operational principle of such instruments is based on the use of the phenomenon of electrostatic induction. This device is essentially an electrostatic generator containing a capacitor of variable capacitance and generates a current proportional to the applied voltage. The charge stored in a capacitor of capacitance C is determined by the following expression:

$$q = C \cdot U.$$

If the capacitance of the capacitor changes with time and the applied voltage U is constant, a current through the capacitor will be:

$$i = U \frac{dC}{dt}.$$

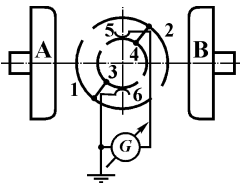


Figure 2.7 – Outline of rotating voltmeter

Figure 2.7 shows a schematic diagram of a generating voltmeter with a cylindrical rotor driven by a synch motor at a constant speed. The voltage being measured is applied to fixed electrodes A and B that excite the electric field. The rotor is separated into semi-cylinders 1 and 2 isolated from its core and each other. When the rotor is rotated at a speed of n rpm, the capacities of the semi-cylinders relative to the electrodes periodically change by the value ΔC , so an alternating current will flow between them. The meanvalue of the current is determined by the following expression:

$$I = \frac{n}{30} \Delta C U.$$

With the help of collector 3, 4 and brushes 5 and 6, the current is rectified and measured by a galvanometer G . The value of ΔC is usually determined by calibration.

Measuring sphere gaps are extensively used in research and test setups. They are simple and ensure sufficient accuracy under condition of correct measuring procedure. Sphere gaps perform two main functions. The first is adjusting the test circuit to the required magnitude of test voltage; the second function is the protection of testing equipment and test object against sudden voltage rise.

Під дією сил електричного поля диск здійснює переміщення і повертає стрілку приладу. Діапазон вимірювання вольтметра залежить від відстані між електродами, який складає від 3 до 500 кВ [22].

Роторні (генераторні) вольтметри. Їх принцип дії ґрунтується на використанні явища електростатичної індукції. Цей прилад по суті є електростатичним генератором, який містить конденсатор зі змінною ємністю і генерує струм, пропорційний прикладеній напрузі. Заряд, що накопичується у конденсаторі ємністю C , визначається за наступним виразом:

$$q = C \cdot U.$$

Якщо ємність змінюється у часі, а прикладена напруга U постійна, у конденсаторі виникає струм:

$$i = U \frac{dC}{dt}.$$

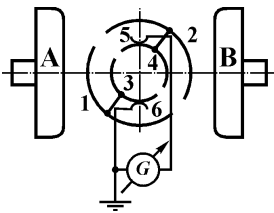


Рисунок 2.7 – Структурна схема роторного вольтметра

На рис. 2.7 показана схема генераторного вольтметра з циліндричним ротором, який обертається за допомогою синхронного двигуна з постійною швидкістю. Вимірювана напруга подається на нерухомі електроди А і В, які створюють електричне поле. Ротор, розділений на напівциліндри 1 і 2, ізолювані від осі ротора і один від одного. В процесі обертання ротора зі швидкістю n об/хв ємності напівциліндрів відносно електродів періодично змінюються на величину ΔC , отже між ними буде текти змінний струм. Середня величина струму визначається за наступним виразом:

$$I = \frac{n}{30} \Delta C U.$$

За допомогою колектора 3, 4 та щіток 5, 6 струм випрямляється і вимірюється гальванометром Г. Величина ΔC за звичаєм визначається експериментально.

Кульові вимірювальні розрядники широко використовуються у науково-дослідних та промислових лабораторіях, завдяки простоті пристрою і прийнятною для практики точністю, яку можна досягнути дотримуючись правильної методики вимірювання. З їх допомогою здійснюється настроювання випробної схеми на потрібну величину випробної напруги. Крім того, вони використовуються як захисні пристрої від раптового підвищення напруги.

The measure of voltage in this case is the length of the air gap between two electrodes of a certain (spherical) shape when a breakdown occurs. The essence of voltage measurement with sphere gaps is that a discharge in a slightly non-uniform electric field in sphere-to-sphere gap in air occurs under a certain voltage with a low dispersion and a small delay. The discharge voltage depends on the sphere-to-sphere gap magnitude, the diameter of the sphere and that how the electrodes are connected.

Measuring sphere gaps are structurally simple devices, but at the same time they provide measurement of the amplitude of AC, DC, and impulse voltages with an error of the order of 2...3%. This accuracy is sufficient for most technical measurements. Attempts to find calculation formulas for the breakdown voltages of sphere-to-sphere gaps did not yield a satisfactory solution. The official document for determining the breakdown voltages of sphere gaps are the IEC tables [31], compiled by the way comparison of the experimental findings conducted by leading HV laboratories.

In measuring DC or AC voltage, the balls are at first pre-arranged at bit more distance than expected discharge gap. Then, the voltage being measured is applied to the gap that is started to decrease down to appearance of the discharge between the balls. At this moment, the gap magnitude is recorded between the balls, by which the measured voltage is determined. The peak of impulse voltages is measured similarly. As the balls are driven closer together, the impulse being measured is applied to the gap with particular frequency and at the discharge moment, the gap is recorded.

To eliminate oscillatory processes, a damping resistor is inserted into the measuring circuit. To obtain stable measurement results, it is necessary to irradiate the discharge gap with ultraviolet radiation or radioactive isotopes, especially at small gaps between the spheres. The surfaces shall be smooth with maximum roughness below 10 μm and free of irregularities in the region of the sparking point. The curvature has to be as uniform as possible, characterized by the difference of the diameter of no more than 2%.

It should be noted that for a long time sphere gaps have been an important component of HV laboratories, but voltage measurement with the gaps is associated with a number of problems. This is, first, necessity to maintain clean surfaces of the spheres, determining corrections to environmental parameters, and others. Today, they do not play such an important role and are used only to check measuring means that in use.

Мірою напруги у даному випадку є довжина повітряного проміжку між двома електродами певної форми при виникненні пробою. Сутність вимірювання високої напруги за допомогою кульового розрядника полягає у тому, що розряд у слабо неоднорідному полі між двома кульовими електродами у повітрі виникає при певній напрузі з малим розкидом і малим запізненням. Розрядна напруга залежить від відстані між кулями, діаметру куль та способу їх включення.

Кульові розрядники є конструктивно простими приладами, але при цьому забезпечують вимірювання амплітуди змінних, постійних та імпульсних напруг з похибкою порядку 2...3 %. Така точність достатня для проведення більшості технічних вимірювань. Спроби знайти розрахункові формули для пробивних напруг кульового розрядника не дали задовільного рішення. Офіційним документом для визначення пробивних напруг кульових розрядників є таблиці МЕК [31], складені на підставі порівняння і співставлення результатів досліджень кульових розрядників, проведених провідними лабораторіями високої напруги.

При вимірюванні постійної та змінної напруги кулі вимірювального розрядника, попередньо встановлюють на відстані декілька більше очікуваної розрядної відстані, а потім зближують до виникнення між ними розряду. В цей момент реєструється відстань між кулями, за якої визначають величину напруги, що вимірюється. Аналогічно вимірюється амплітуда імпульсних напруг. При зміні відстані між кулями до розрядного проміжку з визначеною частотою прикладається імпульс, що вимірюється, і в момент розряду фіксується відстань між кулями.

Для усунення коливальних процесів у вимірювальне коло включається демпфувальний резистор. Щоб отримувати стабільні результати вимірювань потрібно опромінювати розрядний проміжок ультрафіолетовими променями або радіоактивними ізотопами, особливо при малих відстанях між кулями. Поверхні сфер розрядника повинні мати шорсткість не більше 10 мкм, особливо це стосується поверхонь, що стикаються з розрядами. Кривизна поверхні сфер повинні бути рівномірною з відхиленням діаметра не більше 2%.

Слід зазначити, що тривалий час кульові розрядники були важною складовою частиною лабораторій високої напруги, але вимірювання напруги кульовими розрядниками пов'язано з низкою проблем. Це, у першу чергу, підтримання чистоти поверхонь сфер, визначення поправок на параметри навколишнього середовища та інші. Сьогодні вони не відіграють такої важливої ролі і використовуються лише для перевірки наявних вимірювальних засобів.

Series impedances are the simplest measuring transducers used for low and high voltage measurements. For DC voltage measurements, a *high ohmic series resistance* (few hundreds of megohms) is usually used, which is connected in series to a conventional measuring device (usually a moving-coil instrument) as shown in Figure 2.8.

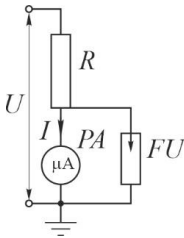


Figure 2.8 – Circuit for DC voltage measurements with series resistance

In this case, the instrument (microammeter) *PA* measures the current I flowing through a high series resistance R . Hence, the measured voltage applied to the measuring circuit will be equal to $U = IR$. In the process, the voltage drop across the instrument is neglected, which is quite acceptable, because its internal resistance is very small. In parallel with the instrument, a protective device (gas discharger) *FU* is connected to protect the instrument against high voltages in case the series resistance R fails or flashes over. To increase the response speed of the protective device, it is connected at one end directly to the terminal of the resistance.

The magnitude of the series resistance is chosen so that at full voltage the current through the resistor is of the order of hundreds of microamps depending on the internal resistance of the voltage source. A high ohmic resistor is usually constructed of a large number of series-connected elements made of carbon or metal films, or wire resistors.

In AC voltage measurements, the use of capacitive series reactance is more suitable. In this case, a circuit similar to the one shown in Figure 2.8 is used. The rms value of the current in this case is measured, as a rule, by an moving-iron instrument. The main disadvantage of utilizing capacitive series reactance is the presence of significant errors when the voltage to be measured contains higher harmonic components.

Voltage transformers are extensively used in relay protections and automatics as transducers. They transform high voltage to voltage convenient for direct measurements. The main advantage of voltage transformers is reliable galvanic isolation (full decoupling) of the measuring circuit from high voltage subcircuit. Along with conventional inductive voltage transformers at voltages of 100 kV and higher, it is economically feasible to use the so-called *capacitive voltage transformer*, which is a combination of capacitive voltage divider and inductive voltage transformer.

Додаткові опори є найбільш простими вимірювальними перетворювачами, які використовуються для вимірювання низьких та високих напруг. Для вимірювання постійної напруги за звичаєм використовується *високоомний резистор* відповідного опору (сотні мегом), який підключається послідовно до стандартного вимірювального приладу як правило магнітоелектричної системи, рис. 2.8.

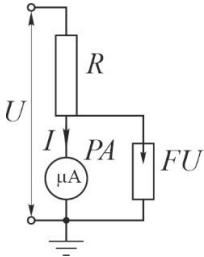


Рисунок 2.8 – Схема вимірювання постійної напруги за допомогою додаткового резистора

У цьому випадку приладом (мікроамперметром) *PA* вимірюється струм I , що протікає через високоомний резистор певного опору R . Отже вимірювана напруга, що прикладена до вимірювального пристрою буде дорівнювати: $U = IR$. При цьому падінням напруги на вимірювальному приладі нехтують, що цілком допустимо, бо його внутрішній опір дуже малий. Паралельно до вимірювального приладу включають запобіжник (газовий розрядник) *FU* для захисту приладу від пошкодження у випадку пробою або перекриття резистору. Для підвищення швидкодії спрацьовування запобіжника його підключають одним кінцем безпосередньо до відводу резистора.

Величину додаткового опору вибирають таким чином, щоб при повній нарузі струм через резистор складав порядку сотень мікроампер в залежності від внутрішнього опору джерела напруги. Високоомний резистор за звичаєм складається з великої кількості послідовно з'єднаних елементів, виконаних з вуглецевих або металевих плівок, або дротяних резисторів.

При вимірюванні змінних напруг більш раціональним є використання *ємнісних додаткових опорів*. При цьому застосовується схема аналогічна той, що надана на рис. 2.8. Діюче значення струму у цьому випадку вимірюють, як правило, амперметром електромагнітної системи. Основним недоліком використання ємнісних додаткових опорів є наявність суттєвих похибок при наявності вищих гармонійних складових у вимірюваній нарузі.

Трансформатори напруги (ТН) набули широке поширення як вимірювальні елементи пристроїв релейного захисту й автоматики. Вони здійснюють перетворення високої напруги у напругу, зручну для виміру. Основною їх перевагою є повна гальванічна розв'язка вимірювального пристрою. Поряд зі звичайними індуктивними ТН при напругах 100 кВ і вище економічно доцільним є використання т.з. *ємнісних ТН*, які являють собою сполучення ємнісного ДН и індуктивного ТН.

However, the experience shows that application of voltage transformers as transducers in test setups is possible only with consideration of certain conditions. First and foremost, the magnetic circuit of the transformer during the all testing cycle should not be saturated. Therefore, it is necessary to apply the voltage transformers with higher voltage ratings and lower rated frequency (at least by 2 times less than the frequency of the voltage to be measured). It should be also noted that impulse voltages as well as arc drop are transformed with considerable distortions because they contains a wide range of harmonics which are transformed with different errors; in the process, near-resonant frequency harmonics are considerably amplified. Thus, accurate recording arc voltage using a voltage transformer is impossible.

As for the use of voltage transformers in test installations for HVAC measurements, it should be noted their higher price compared to other measuring transducers, especially at voltages above 500 kV. Therefore, measuring transformers, like other inductive transducers, are recommended for use in test installations exclusively for the calibration of available transducers.

Voltage dividers are extensively used in HV laboratories since it provides sufficiently high accuracy of high frequency and impulse voltage measurements. A voltage (or potential) divider is a scale transducer that reduces the voltage being measured by a certain number of times, called the *divider ratio*:

$$n = \frac{U_1}{U_2}, \quad (2.11)$$

where U_1 is the voltage to be measured; U_2 is the voltage to be applied to the recording instrument.

The conceptual shortcoming of voltage dividers is the availability of a galvanic coupling between the test object, applied by high voltage, and the measuring circuit. Therefore, in order to ensure safety of the test setup, one of the points of the measuring circuit must be grounded. If the test object has grounded point, a one-arm circuit of voltage divider is used that is shown in Figure 2.9a. If the object has no grounded points, two-arm circuit of voltage is used that is shown in Figure 2.9b.

Однак, як показав досвід, використання ТН у випробних установках можливо лише з урахуванням ряду умов. По-перш за все, магнітопровід протягом усього циклу випробувань не повинен насичуватися, тому варто застосовувати ТН на більш високі класи напруги та більш низьку частоту (не менш як у 2 рази нижче частоти напруги, що вимірюється). Слід також зазначити, що імпульсні напруги, а також напруга на електричній дузі передаються ТН зі значними спотвореннями, оскільки містять широкий спектр гармонік, які передаються з різними похибками. При цьому значно підсилюються гармоніки, частоти яких близькі до резонансної, тому точне осцилографування напруги на дугі та імпульсних напруг за допомогою ТН неможливо.

Що стосується використання ТН у випробних установках для вимірювання чисто синусоїдальної напруги, то слід зазначити більш високу їх ціну у порівнянні з іншими вимірювальними перетворювачами, особливо при напругах вище за 500 кВ. Отже, ТН, як і інші індуктивні перетворювачі, рекомендуються до використання виключно для калібрування наявних вимірювальних перетворювачів.

Дільники напруги (ДН) набули широкого розповсюдження у лабораторіях високої напруги, оскільки забезпечують достатньо високу точність при вимірюваннях високочастотних та імпульсних напруг. ДН являє собою масштабний вимірювальний перетворювач, який здійснює зменшення напруги, що вимірюється, у деяке число разів, яке називають коефіцієнтом поділу

$$n = \frac{U_1}{U_2}, \quad (2.11)$$

де U_1 – вимірювана напруга; U_2 – напруга, що подається до реєструвального приладу.

Принциповим недоліком ДН є наявність гальванічного зв'язку вимірювального кола з досліджуваним об'єктом, тому для забезпечення безпеки одна з точок вимірювальної схеми повинна бути заземлена. Якщо одна з точок об'єкта, що досліджується, заземлена, використовується одноплечевий ДН, рис. 2.9а. Якщо жодна з точок об'єкта, що досліджується, не заземлена – використовується двоплечевий ДН, рис. 2.9б.

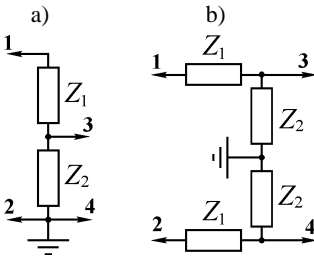


Figure 2.9 – Voltage divider circuits: a) one-arm; b) two-arm

The main components of voltage divider are a low voltage arm Z_2 and high voltage arm Z_1 . Points 1 and 2 of the voltage divider are connected to the test object; points 3 and 4 are connected to the recording instrument.

The main requirement imposed upon voltage divider (and in general upon a measuring system with a voltage divider) is non-distorting transmission of the voltage being measured from the investigate object

to the recording instrument. This is possible only in the case when the high-voltage and measuring parts of the circuit are fully identical. However, this cannot be achieved in actual measuring systems, because the one, besides a voltage divider and recording instrument, contains connecting wires, transmission system, shielding and matching components. Thus, one of the main problem to design a measuring system is to ensure the minimum distortions of the voltage being measured.

It should be noted also that the accuracy of measurements with a voltage divider essentially depends on the presence of partial discharges (PD). Therefore, the top and grading electrodes, and the column of the divider must be PD-free due to dust and pollution, especially in case of high air humidity.

Another important requirement, imposed upon measuring system with voltage divider, is the absence of influence on the process being investigated. For example, when the recovery voltage is measured, input impedance of the divider should be sufficiently high and its input capacitance should not be great. Otherwise, the recovery voltage parameters being measured can be considerably distorted.

Research and testing experience shows that the voltage divider practically does not effect on the recovery voltage process if its input impedance in excess of 100 kOm, and the input capacitance does not exceed 10...15 pF [42].

There exist several varieties of voltage dividers according to the type of elemental base used. The most extensive application in research and test setups has resistive, capacitive and resistive-capacitive voltage dividers. The application of this or that type is defined by the type and parameters of the voltage measured.

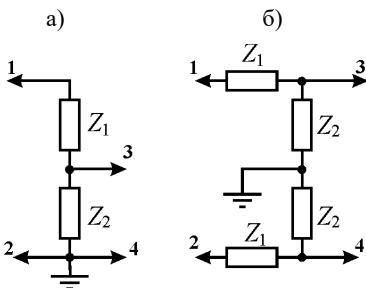


Рисунок 2.9 – Схеми підключення дільників напруги: а) одноплечевого; б) двоплечевого

Основними елементами ДН є низьковольтне плече Z_2 , до якого приєднується реєструвальний прилад, (точки 3–4) і високовольтне плече Z_1 , що підключається до об'єкта, що досліджується (точки 1–2).

Основною і головною вимогою до ДН та вимірювального пристрою в цілому є відсутність спотворень вимірюваної напруги. Це можливо лише при точній подобі частини схеми, що знаходиться під високою напругою і

вимірювальної її частини. Однак в реальних умовах цього досягти неможливо, оскільки вимірювальний пристрій, окрім ДН, містить з'єднувальні проводи, кабелі, погоджувальні елементи та реєструвальний прилад. Отже, задачею створення вимірювального пристрою є вибір параметрів, при яких відхилення напруги, що реєструється осцилографом, від вимірюваної напруги, (з урахуванням коефіцієнта поділу) знаходилося у припустимих межах.

Слід також зазначити, що точність вимірювання ДН суттєво залежить також від наявності часткових розрядів. Отже, вони не повинні виникати на поверхнях верхнього та екранувального електродів, а також корпусі внаслідок пилу та забруднень, особливо при високій вологості повітря.

Не менш важливою вимогою до вимірювальних схем з ДН є відсутність впливу на досліджуваний процес. Наприклад, при вимірюванні поновленої напруги на контактах, недостатньо високий вхідний опір і велика вхідна ємність ДН може привести до істотного спотворення його параметрів.

Як показала практика досліджень, ДН практично не впливає на процес поновлення напруги, якщо його вхідний опір не менше 100 кОм, а вхідна ємність не перевищує 10–15 пФ [42].

Існує декілька різновидів ДН в залежності від типу елементної бази. Найбільш широкого використання у вимірювальних пристроях випробних та експериментальних установок отримали омичні, ємнісні та ємнісно-омичні ДН. Використання того або іншого виду визначається видом та параметрами вимірюваної напруги.

Resistive (or ohmic) dividers. In this case, both arms are pure resistances. Resistive dividers have usually an aperiodic response to a voltage step, i.e., their main type of distortion is front smoothing. The frequency characteristics of resistive dividers have specific fall (roll-off) in the high frequency range, as shown in Figure 2.10a; therefore, they are used mainly for HVDC measurements. To measure the parameters of lightning impulses, resistive dividers with low input resistance (low-resistive dividers) are used, but their use is impractical at voltages higher than one MV.

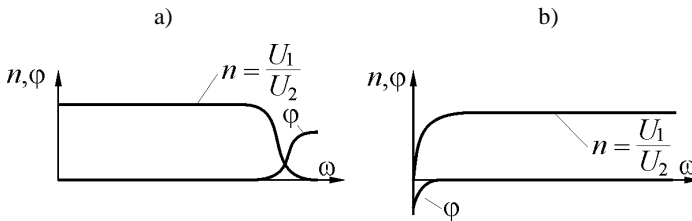


Figure 2.10 – Typical frequency response of resistive (a) and capacitive (b) voltage dividers

Capacitive dividers. In this case, both arms have capacitive reactance. Capacitive dividers have usually oscillating response on a voltage step and, correspondingly, their main type of distortions are overshoots. Hence, the inductance of the wires that connect the divider with the voltage source should be minimal that is the main reason for the limited application of purely capacitive DNs. An equally important reason for their limited application in test installations is they affect the process under investigation (for example, the recovery voltage parameters).

The frequency characteristics have specific fall (roll-off) in the range of low frequencies, as shown in Figure 2.10b; therefore, they are used for HVAC and switching impulse measurements. To measure the parameters of lightning impulses, capacitive dividers with damping resistors are used.

Capacitive-resistive (universal) dividers are extensively used in testing setups for switching tests, since they provide a sufficiently high transmission accuracy of the voltage being measured in a wide frequency range. Their main disadvantage is a more complex construction compared to resistive or capacitive dividers. The measuring circuit with capacitive-resistive divider is shown in Figure 2.11.

Омічні ДН. У цьому випадку обидва плечі являють собою активні опори. Омічні ДН мають, як правило, аперіодичний характер реакції на прямокутний імпульс напруги, тобто основний вид спотворення є згладжування фронту. Частотні характеристики омічних ДН мають характерні «завали» в області високих частот, рис. 2.10а, отже використовуються, головним чином, для виміру постійної напруги. Для вимірювання параметрів грозових імпульсів використовують омічні ДН з малим вхідним опором (низькоомні ДН), але при напругах більше 1 МВ їх використання є недоцільним.

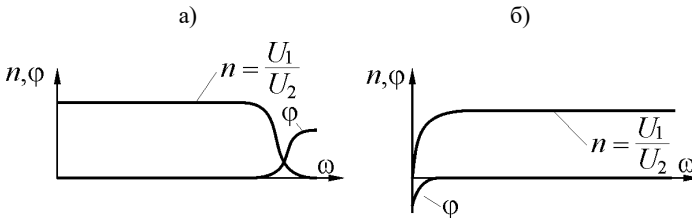


Рисунок 2.10 – Типові частотні характеристики омічних (а) та ємнісних (б) ДН

Ємнісні ДН. У цьому випадку обидва плечі являють собою ємнісні опори. Ємнісні ДН мають, як правило, коливальний характер реакції на прямокутний імпульс напруги, тобто основний вид спотворення є викиди напруги. Тому, індуктивність проводів, які з'єднують ДН з джерелом напруги, повинна бути мінімальною, що є основною причиною обмеженого використання чисто ємнісних ДН. Не менш важливою причиною обмеженого використання ємнісних ДН у випробних установках є вплив на процес, що досліджується (наприклад, параметри поновлюваної напруги).

Частотні характеристики ємнісних ДН мають «завали» в області низьких частот, рис. 2.10б, отже використовуються для вимірювання змінної напруги, а також параметрів комутаційних імпульсів. Для вимірювання параметрів грозових імпульсів використовуються ємнісні ДН з демпфувальними резисторами.

Ємнісно-омічні (універсальні) ДН використовуються для виміру напруги у широкому діапазоні частот і усіх видів випробних напруг. Вони набули широкого поширення при проведенні комутаційних і інших випробувань електричних апаратів. Їх основним недоліком є більш складна конструкція у порівнянні з резистивними або ємнісними ДН. Вимірювальна схема з ємнісно-омічним ДН надана на рис. 2.11.

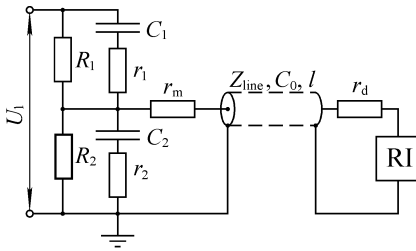


Figure 2.11 – Measuring circuit with resistive-capacitive voltage divider

length, respectively; r_m is the matching resistor; r_d is the damping resistor.

The divider parameters are selected according to its ratio:

$$n = \frac{C_2}{C_1} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{r_1}{r_2}. \quad (2.12)$$

Resistance of the low-voltage arm R_2 must be at least two orders more than the cable wave impedance. Its capacitance C_2 should be by 50–100 times more than capacity of the line C_0l . The magnitudes of damping resistors are selected in compliance with the following condition: $r_2 \ll Z_{\pi}$ (minimum by two orders) and divider ratio.

The total height of the voltage divider is determined by the requirements related to its external insulation, that is, the electrical strength of the surrounding air. The height of the divider can be significantly reduced by optimizing the shape and size of the electrodes, but the average voltages are chosen moderately high to take into account the specific insulation problems that arise at different types of measured voltage.

The specific heights of voltage dividers are usually chosen according to the type of measured voltage:

- HVDC – 2.5...3.0 m/MV;
- lightning impulse – 2.0...2.5 m/;
- switching impulse – 4.0...5.0 m/MV;
- HVAC (rms value) – 4.0...5.0 m/MV.

When a voltage of several hundreds of kilovolts is measured, usually no problem to choose the size of the divider, since the required area is small. In ultra-high voltage ranges, very large sizes of a divider is required because the dependence of the discharge voltage on the distance between the electrodes is highly nonlinear.

The main component of the measuring circuit is the capacitive-resistive voltage divider with the following parameters: C_1, C_2, R_1, R_2 , which define its ratio; r_1, r_2 are the so-called damping resistors intended to limit currents in the event of voltage chopping; Z_{line}, C_0, l are the parameters of the transmission system: wave impedance, running capacitance, and coaxial cable

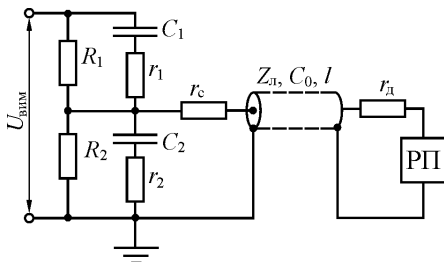


Рисунок 2.11 – Вимірювальна схема з ємнісно-омічним ДН

Основним елементом вимірювальної схеми є ємнісно-резистивний ДН з наступними параметрами: C_1, C_2, R_1, R_2 , які визначають його коефіцієнт поділу; r_1, r_2 – демпфувальні резистори, які призначені для обмеження струмів при зрізах напруги; $Z_{л}, C_0, l$ – параметри лінії передачі вимірювального сигналу: хвильовий опір, погонна ємність та довжина, від-

повідно; r_c – погоджувальний резистор; $r_{д}$ – демпфувальний резистор.

Параметри ДН вибираються виходячи з заданого коефіцієнта поділу

$$n = \frac{C_2}{C_1} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{r_1}{r_2}. \quad (2.12)$$

Опір низьковольтного плеча R_2 повинен, як мінімум на 2 порядки перевищувати хвильовий опір лінії. Його ємність C_2 повинна бути в 50–100 разів більше ємності лінії C_0l . Величини демпфувальних опорів ДН вибираються з умови $r_2 \ll Z_{л}$.

Загальна висота ДН визначається необхідною зовнішньою ізоляцією, тобто електричною міцністю навколишнього повітря. Висота ДН може бути суттєво зменшена за рахунок оптимізації форми та розмірів електродів, але середні напруженості обирають не дуже високими, щоб урахувати специфічні ізоляційні проблеми, які виникають при різних видах вимірюваної напруги.

За звичаєм питомі висоти ДН вибирають наступними:

- 2,5...3,0 м/МВ при постійній напрузі;
- 2,0...2,5 м/МВ при грозових імпульсах;
- 4,0...5,0 м/МВ при комутаційних імпульсах;
- 4,0...5,0 м/МВ (діюче значення) при змінній напрузі.

При вимірюванні напруги у декілька сотень кіловольт проблеми вибору розмірів ДН звичайно не виникає, оскільки потрібна площа невелика. В області ультрависоких напруг сильна нелінійна залежність розрядної напруги від відстані між електродами обумовлює дуже великі розміри ДН.

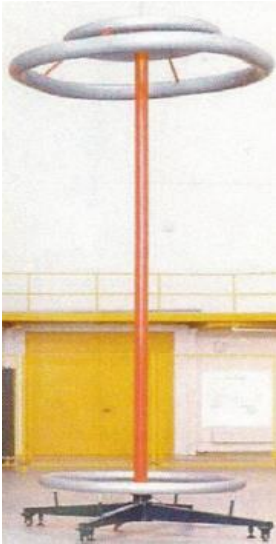


Figure 2.12 – Photograph of a 2.2-MV resistive voltage divider

As an example, a photograph of a 2.2 MV resistive voltage divider is shown in Figure 2.12 [20]. Working elements of the divider high-voltage arm are arranged in a cylindrical insulating case of relatively small diameter, filled with transformer oil, which provides insulation between the elements, driving out heat, and eliminates discharges on the surface of the elements that can appear on the side of high potential at high field strength. Recently, S_6 -gas is used instead of oil. Working elements of the divider low-voltage arm and matching resistor are placed in a steel screening box, which is located at the divider bottom and is grounded.

2.5 Current measurements

The structure of a measuring circuit for current measurements is defined by its magnitude and the behavior over time. The steady-state currents of relatively small magnitudes (below 50 A) are measured at once by conventional ammeters of the relevant systems and accuracy ratings, according to the responsibility of the measurements being carried out.

However, in the course of research and testing in short-circuit conditions there is frequently necessity to measure sufficiently high currents (tens of kiloamperes). It should be noted also that in research and testing electric and power electronic apparatus current measurements could perform not only in steady state, but also in transient conditions. In such cases, various types of measuring transducers are used, such as low-inductive shunts, magnetic and non-magnetic cored current transformers, as well as current transducers with employment of various effects (optical Faraday Effect, Hall Effect etc.). Let us consider the most extensively used transducers in research and test setups.

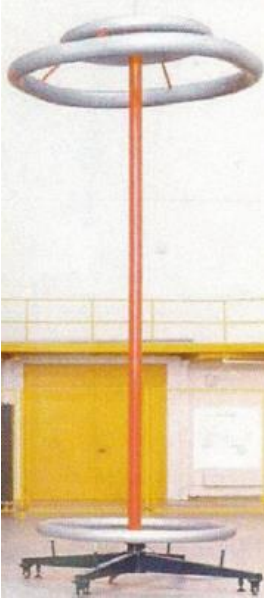


Рисунок 2.12 – Фото резистивного ДН на 2,2 МВ

Як приклад, на рис. 2.12 надана фотографія резистивного ДН на 2,2 МВ [20]. Робочі елементи ДН, як правило, розміщуються у циліндричному ізоляційному корпусі порівняно невеликого діаметра. Корпус заповнюється трансформаторним маслом, яке забезпечує ізоляцію між елементами, відведення тепла, а також усуває розряди по поверхні елементів, які виникають на стороні високого потенціалу при великій напруженості поля. Останнім часом замість масла використовується елегаз. Робочі елементи низьковольтного плеча ДН і узгоджувальний резистор, як правило, розміщуються в сталевому екрануючому кожусі, який розташовується у нижній частині ДН і заземлюється.

2.5 Вимірювання струмів

Структура вимірювального пристрою для вимірювання струму визначається його величиною та характером зміни у часі. Сталі значення відносно невеликих струмів (до 50 А) вимірюють, як правило, безпосередньо стандартними амперметрами відповідних систем і класів точності, в залежності від відповідальності проведених вимірювань.

Однак, при дослідженнях та випробуваннях в режимах короткого замикання необхідно вимірювати струми, що досягають десятків і сотень кілоампер. Слід також зазначити, що в процесі досліджень та випробувань електричних та електронних апаратів вимірювання часто здійснюються не тільки у сталих, але й у перехідних режимах. В таких випадках використовують різного роду вимірювальні перетворювачі. Найбільш широке розповсюдження у дослідницьких та випробних установках набули: безіндуктивні шунти, трансформатори струму з сердечником і без сердечника (з немагнітним сердечником), а також вимірювальні засоби з використанням різних ефектів (оптичний ефект Фарадея, ефект Холла і т. п.).

Low-inductive shunts refers to resistive converting devices and provide sufficiently high accuracy of current measurements, while they are the most suitable and simple ones. Therefore, this type of measuring transducers is widely used in research and test setups. An essential shortcoming resulted from application of shunts is available galvanic coupling between power and measuring circuits. By this why, the use of instrument shunts is possible only in the case the subcircuit, where a current is measured, is grounded. Two main variations of instrument shunts are used in test setups:

- *high-resistive shunts*, with a resistance of about milliohms and voltage drop in the range of 1 to 2 V, applied usually in testing insulation structures of HV apparatus;
- *low-resistive shunts*, with a resistance of about microohms and voltage drop in the range of 50 to 100 mV, used usually for high current measurements.

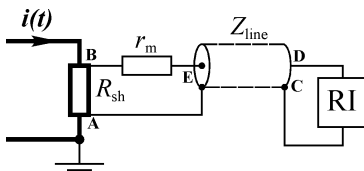


Figure 2.13 – Measuring circuit with instrument shunt

The instrument shunt is a certainly shaped conductor made of high resistive material (nichrome, manganin etc.). Measuring system with application of instrument shunt is shown in Figure 2.13. It contains a shunt R_{sh} connected into a circuit, where a current $i(t)$ is measured.

Certain points of the shunt A-B are connected to the measuring circuit that usually includes the following components: a line (usually HF cable) to transmit the measuring signal to recording instrument RI (usually millivolt meter, oscilloscope or digital recorder) and matching resistor R_m . The resistance for matching resistor is taken equal to wave impedance of the line, because $R_{sh} \ll Z_{line}$, where R_{sh} is the resistance of the shunt; Z_{line} is the wave impedance of the line.

The main requirement imposed upon the measuring circuit with instrument shunt is the voltage applied to the recording instrument should be accurately proportional to the current being measured:

$$u_{CD}(t) = K \cdot i(t), \tag{2.13}$$

where K is the conversion ratio, independent on the magnitude of the current and its rate of time-change.

Безіндуктивні шунти є резистивними перетворювачами і забезпечують достатньо високу точність вимірювань струмів. Вони є найбільш зручними та відносно простими вимірювальними перетворювачами, тому набули широкого використання у випробних установках. Суттєвим недоліком використання шунтів є відсутність гальванічної розв'язки між силовим колом та вимірювальним контуром, тому його використання можливо тільки у тому випадку, коли ділянка кола, на якій вимірюється струм, заземлена. При випробуваннях електричних та електронних апаратів застосовується два види шунтів:

- *високоомні шунти* з опором порядку міліом і падінням напруги 1–2 В, які використовуються, головним чином, при випробуваннях ізоляційних конструкцій високовольтних апаратів;

- *низькоомні шунти* з опором порядку мікроом і падінням напруги 50–100 мВ, які використовуються для вимірювання великих струмів, у тому числі струмів короткого замикання.

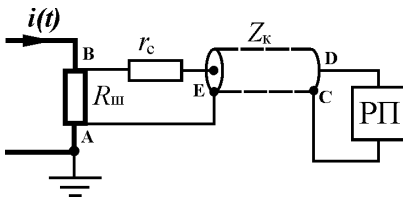


Рисунок 2.13 – Схема вимірювання струму з використанням шунта

Безіндуктивний вимірювальний шунт являє собою провідник певної форми, виготовлений з матеріалу з високим питомим опором (ніхром, манганін і т.п.). Схема вимірювального пристрою з використанням вимірювального шунта надана на рис. 2.13. Вона містить шунт $R_{ш}$, який включається у коло, в якому вимірюється струм $i(t)$. Певні точки шунта А та В підключаються до вимірювального кола, яке містить: лінію передачі вимірювального сигналу (високочастотний кабель) до реєструвального приладу РП (мілівольтметр, осцилограф або цифровий реєструвальний пристрій), а також погоджувальний резистор R_c . Опори погоджувальних резисторів приймаються такими, що дорівнюють хвильовому опору кабелю. оскільки $Z_k \gg R_{ш}$, де $R_{ш}$ – опір шунта; Z_k – хвильовий опір лінії передачі вимірювального сигналу.

Основною вимогою до вимірювального шунта є повна відповідність напруги на затисках вимірювального кола струму, що вимірюється:

$$u_{CD}(t) = K \cdot i(t), \quad (2.13)$$

де K – коефіцієнт пропорційності, що не залежить від величини струму $i(t)$ і швидкості його зміни.

In the cases of direct current and low its rate of change (including power frequency alternating currents), this condition is always fulfilled because:

$$u_{CD} = R_{sh} \cdot i \quad (2.14)$$

where R_{sh} is the shunt pure resistance.

In the cases of high frequency and high rate of current measurements (including impulse current measurements) this compliance is violated. The voltage drop applied to the recording instrument in transient conditions will satisfy by the following equation:

$$u_{CD}(t) = u_{AB}(t) + \frac{d\Psi}{dt} \quad (2.15)$$

It has two components. The first one is determined by the voltage drop between points A and B caused by the shunt active resistance:

$$u_{AB} = R_{sh} \cdot i \quad (2.16)$$

The second component is resulted from the self-inductance of the shunt's conductor, as well as flux linkage of the ABE (see Figure 2.13) inductive loop with the magnetic field excited by the shunt, as well as extraneous fields (sections of the current ducts attached to the shunt). In addition, the condition (2.16) is not always fulfilled due to the skin effect.

Thus, the voltage drop $u_{CD}(t)$ applied to recording instrument is defined not only by the magnitude of the current being measured, but also its rate of change. Hence, the requirement of proportionality between $i(t)$ and $u_{CD}(t)$ in this situation is not fulfilled. At the same time, it should be pointed out that the self-inductance of a shunt is usually very small and in most cases is not taken into consideration, but the influence of other factors is quite appreciable.

To enhance the accuracy of the measurements, first and foremost, it should be reduced the area bounded by the ABE loop as it is possible. The more difficult problem is to preclude influence of skin-effect. This problem is usually solved by constructive means, namely, the application of thin-walled conductors. The main condition of no influence of skin-effect is the conductor wall thickness must be much less than penetration depth evaluated by the following expression:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu\mu_0}} \quad (2.17)$$

При вимірюванні постійних струмів і таких, що повільно змінюються, ця вимога завжди виконується

$$u_{CD}(t) = R_{ш} \cdot i(t), \quad (2.14)$$

де $R_{ш}$ – активний опір шунта.

При вимірюванні змінних, імпульсних і перехідних струмів, що швидко змінюються, така відповідність порушується. Падіння напруги, що реєструється приладом, у перехідному режимі буде відповідати наступному рівнянню

$$u_{CD}(t) = u_{AB}(t) + \frac{d\Psi}{dt}, \quad (2.15)$$

Воно містить дві складові. Перша визначається падінням напруги між точками А та В, яке обумовлено активним опором шунта:

$$u_{AB} \ t = R_{ш} \cdot i \ t, \quad (2.16)$$

Друга складова обумовлена власною індуктивністю провідника шунта, а також потокозчепленням з контуром АВЕ (див. рис. 2.13) власного магнітного поля шунта і сторонніх полів (ділянок струмопроводу, що прилягають до шунта). Крім того, не завжди виконується умова (2.16) внаслідок поверхневого ефекту.

Таким чином падіння напруги $u_{CD}(t)$, що надходить до реєструвального пристрою, визначається не тільки величиною струму, що вимірюється, але й швидкістю його зміни. Отже вимога щодо пропорційності між $i(t)$ та $u_{CD}(t)$ у цьому випадку не виконується. При цьому слід зауважити, що власна індуктивність шунта, як правило, є дуже малою й у більшості випадків не враховується. Однак вплив інших чинників дуже помітний.

Для підвищення точності вимірювань потрібно, поперед за все, зменшити площу, яку охоплює контур АВЕ, наскільки це можливо. Більш складною проблемою є уникнути впливу поверхневого ефекту. Вона вирішується головним чином конструктивними методами, а саме використанням тонкостінних провідників. Основна умова відсутності впливу поверхневого ефекту є такою: товщина стінки провідника шунта повинна бути набагато менше глибини проникнення електромагнітної хвилі, яка визначається за наступним виразом:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu\mu_0}}, \quad (2.17)$$

where ρ , μ are the electrical and magnetic properties of the shunt's material: resistivity and relative permeability, respectively; ω is the angular frequency of the current being measured.

The basic design solutions of low-inductive shunts intended for high frequency and impulse current measurements are represented in a Figure 2.14.

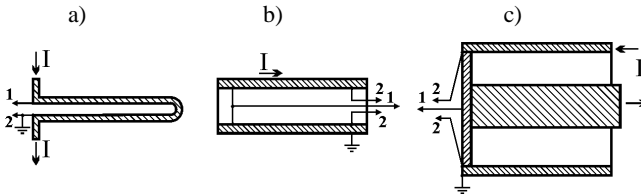


Figure 2.14 – Basic design solutions of low-inductive shunts:
a) loop-shaped; b) tubular-shaped; c) disc-shaped

Current transformers represent inductive measuring transducers. As differentiated from a shunt, current transformer ensures a full galvanic decoupling between power circuit, and measuring one, which is significant their advantage. There are two variations of current transformers. The first is *iron-cored transformers* extensively used in relay protection and automatic systems. However, it should be noted that they are practically unsuitable for precise measurements of short-circuit currents because of great errors. Therefore, in research and test set-ups, they are mainly used only for the qualitative estimation of the fault processes.

Another variation of current transformers is *non-magnetic-cored transformers* also known as *Rogowski coil*. Such devices are extensively used for measurements of impulse currents and currents changing with high rate. Recently Rogowski coil finds application in microprocessor-based automatic and relay protection systems. The circuit for recording current with the help of Rogowski coil is shown in Figure 2.15.

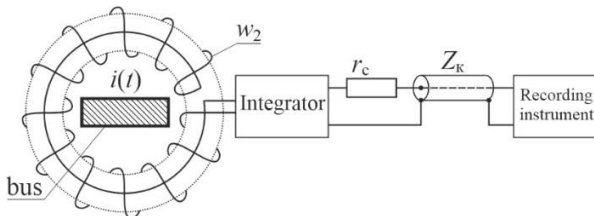


Figure 2.15 – Measuring circuit with Rogowski coil

де ρ , μ – електричні та магнітні властивості матеріалу шунта: питомий опір та відносна магнітна проникність, відповідно; ω – кутова частота вимірюваного струму.

Основні конструктивні рішення вимірювальних шунтів призначених для вимірювання височастотних та імпульсних струмів надані на рис. 2.14.

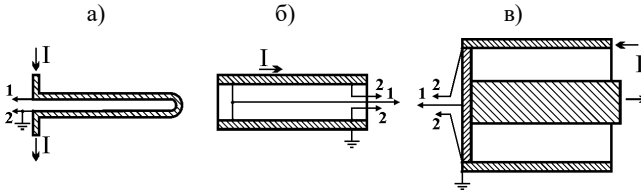


Рисунок 2.14 – Основні конструктивні рішення вимірювальних шунтів:
а) петльовий шунт; б) трубчастий шунт; в) дисковий шунт

Трансформатори струму являють собою індуктивні вимірювальні перетворювачі. На відміну від шунтів, трансформатори струму (ТС) забезпечують надійну гальванічну розв'язку між силовою та вимірювальною колами, що є суттєвою їх перевагою. Існує два різновиди ТС. Перший – це ТС з *феромагнітним сердечником*, які набули широко використовуються у пристроях автоматики та релейного захисту. Проте, вони практично непридатні для точних вимірювань струмів короткого замикання внаслідок наявності великих похибок. При дослідженнях та випробуваннях апаратів вони використовуються, головним чином, для якісної оцінки перехідних процесів.

Інший різновид ТС – це трансформатори з *немагнітним сердечником*, відомі також як *пояс* або *котушка Роговського*, які широко застосовуються для вимірювання імпульсних струмів та струмів, що швидко змінюються у часі. В останній час котушка Роговського широко використовується також і в мікропроцесорних пристроях релейного захисту. Схема реєстрації струму за допомогою поясу Роговського надана на рис. 2.15.

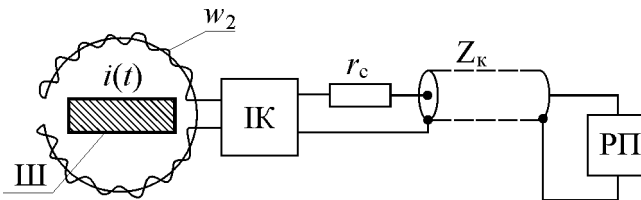


Рисунок 2.15 – Схема вимірювання струму за допомогою поясу Роговського

The current being measured $i(t)$ passes through the bus (see Figure 2.15). In compliance with Faraday's law of induction, electromotive force is induced in secondary winding w_2 that is expressed as follows:

$$e_2(t) = \frac{d\Psi_2(t)}{dt}, \quad (2.18)$$

where $\Psi_2(t)$ is the flux linkage of the secondary winding.

Since in this case the core is not ferrous, the flux linkage will behave in the same manner as the current to be measured, and electromotive force induced in secondary winding will be expressed as follows:

$$e_2(t) = K \frac{di(t)}{dt}, \quad (2.19)$$

where K is the constant value.

Thus, the electromotive force generated by the secondary winding is proportional to derivative of the current to be measured. In order to record the trace $i(t)$, the measuring circuit is connected to the secondary winding via an integrating circuit IC with a fairly long (more than one second) time-constant.

Structurally, the Rogowski coil design is similar to iron-cored current transformer, but it is imposed by additional requirements that consist in the following. It is firstly uniform and dense wrap of turns on the form and, the second requirement is the availability of an internal loop to compensate the effect of external magnetic fields directed towards perpendicular to the plane of the drawing.

Hall generators refer to measuring element, in which the *Hall Effect* is employed consisting in the following. When a metallic strip carrying an electric current is in magnetic field, then moving charge carriers, experienced by Lorenz's force, deflect to a side. It result in generation of a potential difference called the *Hall voltage* or *Hall electromotive force* directed perpendicularly to both the current flow and magnetic field lines. Because of its very small magnitude, the Hall Effect during a long time had purely scientific interest. However, with the advance of semiconductor technology, it has been found that a number of elements and their compounds have a sufficiently high Hall's electromotive force. It has resulted in extensive employment of Hall Effect in measuring systems of research and test setups.

Вимірюваний струм $i(t)$ проходить по шині Ш (див. рис. 2.15). У відповідності до закону електромагнітної індукції у вторинній обмотці w_2 індукується е.р.с.

$$e_2(t) = \frac{d\Psi_2(t)}{dt}, \quad (2.18)$$

де $\Psi_2(t)$ – потокозчеплення вторинної обмотки ТС.

Оскільки сердечник ТС неферомагнітний, величина потокозчеплення буде змінюватись пропорційно вимірюваному струму, отже е.р.с. буде відповідати наступному виразу:

$$e_2(t) = K \frac{di(t)}{dt}, \quad (2.19)$$

де K – постійна величина.

Таким чином, електрорушійна сила, що індукується у вторинній обмотці пропорційна похідній вимірюваного струму. Для отримання осцилограми $i(t)$ до вторинної обмотки підключається інтегратор ІК з відносно великою (більше 1 с) постійною часу.

За конструкцією пояс Роговського аналогічний ТС із сердечником. Відмінними рисами його вторинної обмотки є, по-перше, рівномірна і щільна намотка витків на каркас, і, по-друге, наявність внутрішньої петлі, що необхідна для компенсації впливу зовнішнього магнітного поля, перпендикулярного площини креслення.

Перетворювачі Холла являють собою вимірювальні елементи, в яких використовується *ефект Холла*, сутність полягає в наступному. Якщо металева пластинка зі струмом розташована у магнітному полі, то на електрони діє сила Лоренца, у результаті чого виникає зсув зарядів внаслідок чого виникає різниця потенціалів (*е.р.с. Холла*), направлена перпендикулярно лініям струму і магнітного поля. Через дуже малу її величину ефект Холла довгий час представляв лише науковий інтерес. Однак, з розвитком напівпровідникової техніки з'ясувалося, що ряд елементів і їх сполук мають досить велику е.р.с. Холла, що привело до широкого практичного використання ефекту Холла у вимірювальних пристроях дослідницьких та випробних установок.

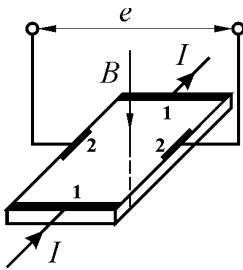


Figure 2.16 – Hall Effect in semiconductor wafer

The main component of Hall generator is a wafer or a semiconductor film fitted with two pairs of barrier-free contacts shown in Figure 2.16. Contacts 1-1' are current electrodes; 2-2' are Hall electrodes or output ones. When a current I flows between contacts 1-1' of the wafer located in a magnetic field with flux density B that is perpendicular its plane, the electromotive force induced between electrodes 2-2' will be:

$$e = \kappa \cdot I \cdot B, \tag{2.19}$$

where k is the constant for the given wafer.

This relationship is the base to construct measuring circuits, in particular current transducers or magnetic field sensors. Let us consider an example of an outline for current measurement with use of a Hall generator shown in Figure 2.17.

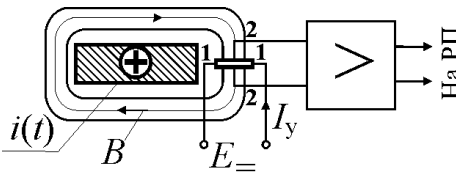


Figure 2.17 – Current measurement with Hall generator

Hall generator is placed in the air gap of a toroidal magnetic core that envelopes the bus carrying the current being measured $i(t)$. Invariable in value direct current I_c passes between the current electrodes 1-1' of the Hall generator. If the core is unsaturated in the measurement

process, the magnetic flux (and flux density B) are proportional only to the current. Hence, Hall electromotive force between contacts 2-2' will be proportional to the current being measured $i(t)$.

Utilization of Faraday Effect. Magneto-optical effect also known as Faraday Effect is the phenomenon consisting in that the polarization plane of a polarized light wave that passes through an optically transparent dielectric material (for instance, fiber optic channel) turns at the presence of a magnetic field. A linear light wave can be represented as a pair of light waves with left and right circular polarization, which jointly propagate in the medium. In a magnetic field, these waves propagate at different speeds, and thus a phase difference accumulates between them resulting in rotation of the resultant wave with linear polarization by an angle expressed as follows:

$$\Delta\phi = 4VN\phi \vec{H}\vec{d}l, \tag{2.19}$$

where V is the Verdot constant dependent on the material

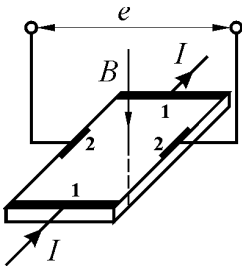


Рисунок 2.16 – Ефект Холла у напівпровідниковій пластині

Основним елементом перетворювача Холла є напівпровідникова пластинка або плівка з двома парами невідпрямлювальних контактів, рис. 2.16. Контакти 1-1 – є струмовими електродами; 2-2 – вихідними електродами. Якщо між контактами 1-1 протікає струм I і пластина розташовується в магнітному полі з індукцією B перпендикулярній її площини, то на електродах 2-2 виникає е.р.с.

$$e = \kappa \cdot I \cdot B, \quad (2.19)$$

де κ – постійна для даної пластини.

Дане співвідношення лежить в основі створення вимірювальних пристроїв, зокрема датчиків струму. Як приклад розглянемо датчик струму для виміру великих струмів, рис. 2.17.

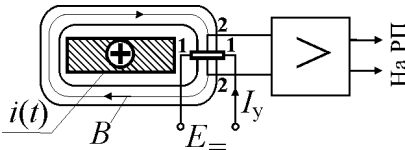


Рисунок 2.17 – Вимірювання струму за допомогою перетворювача Холла

Перетворювач Холла встановлено у повітряний зазор тороїдального сердечника, в якому магнітний потік (і магнітна індукція) пропорційні струму, що вимірюється $i(t)$. Через пластину пропускають постійний за величиною струм I_y . Якщо сердечник в процесі вимірювання не насичується, то магнітний потік (та індукція) буде пропорційним лише величині струму. Отже, е.р.с. Холла, що знімається з контактів 2-2 буде пропорційна струму, що вимірюється $i(t)$.

Використання ефекту Фарадея. Ефект Фарадея або магнітооптичний ефект це явище повороту площини поляризації поляризованої світлової хвилі, яка проходить через прозору діелектричну речовину (наприклад, оптоволоконний канал), при наявності магнітного поля. Лінійна світлова хвиля може бути надана парою світлових хвиль з лівою і правою круговою поляризацією, які спільно поширюються у середовищі. У магнітному полі дві хвилі з круговою поляризацією поширюються з різною швидкістю, і тим самим між ними накопичується різниця фаз, що призводить до повороту результуючої хвилі з лінійною поляризацією на кут, який визначається за наступним виразом:

$$\Delta\phi = 4VN \oint \vec{H} \vec{dl}, \quad (2.19)$$

де V – постійна Вердо, яка залежить від матеріалу.

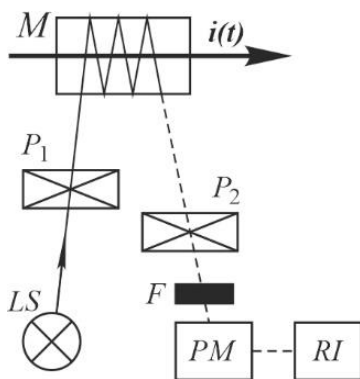


Figure 2.18 – Schematic diagram of current measurement with magneto-optical effect

Figure 2.18 shows a schematic diagram of current measurement using the magneto-optical effect. A beam of light from a stabilized light source *LS* passes via the polarizer *P*₁ and enters the medium *M*, where under the action of the magnetic field produced by the current to be measured $i(t)$, undergoes rotation of its plane of polarization. In this case, the light beam must pass parallel to the magnetic force lines. After passing through the analyzer *P*₂ and filter *F*, which allows to transmit only monochromatic light, the beam enters the photoelectric multiplier *PM*, from the output of which it passes to the recording instrument *RI*. The main

advantage of the method is the reliable galvanic isolation of the measurement circuit from the circuit of the current being measured.

Recently, this effect began to be widely used in measuring technology, in particular for measuring large currents. The so-called optical-electronic current transformers, various current sensors are developed. For example, the ABB company has developed an optical fiber current sensor FOCS (fiber optic current sensor), which enables to measure currents up to 600 kA, providing high measurement accuracy of $\pm 0.1\%$ [27].

2.6 Electrical Power and Energy Measurements

In this case, also as in voltage and current measurements, i.e. in steady state conditions, the electrical power and energy being consumed over relatively long time span are usually measured with standard meters. In the process, if this is necessary (in the cases of high currents or voltages) appropriate transducers are applied, (see subsections 2.4 and 2.5).

However, during research and testing of electrical and power electronic apparatus, it is frequently necessary to measure power and energy in transient conditions. For example, the power and energy of an electric arc or a power semiconductor device. In such cases, the measurement technique is significantly different, it is necessary to provide simultaneous recording current and voltage and their physical multiplication, which is the main problem of power measurement. In order to energy recording, it is necessary to ensure additionally the physical integration of the power signal.

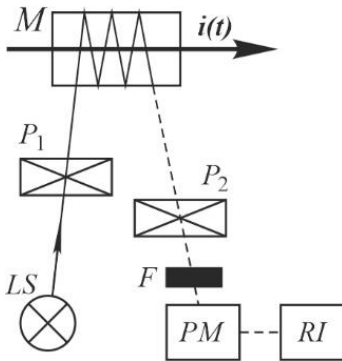


Рисунок 2.18 – Схема вимірювання струму з використанням ефекту Фарадея

На рис. 2.18 показана принципова схема вимірювання струму з використанням магнітооптичного ефекту. Пучок світла від стабілізованого джерела LS проходить через поляризатор P_1 і потрапляє у середовище M , де під дією магнітного поля, що утворюється вимірюваним струмом $i(t)$, відбувається поворот площини поляризації. При цьому промінь світла повинен проходити паралельно магнітним силовим лініям. Після проходження через аналізатор P_2 і фільтр F , який пропускає тільки монохроматичне світло, пучок потрапляє на фотоелектричний помножувач PM , з виходу якого надходить на ресетрувальний

прилад RI . Основною перевагою методу є надійна гальванічна розв'язка кіл вимірювання та вимірюваного струму.

Останнім часом цей ефект почав широко використовуватися у вимірювальній техніці, зокрема для вимірювання великих струмів. Розробляються т.з. *оптико-електронні ТТ*, різні датчики струму. Наприклад, компанія АББ розробила оптоволоконний датчик струму FOCS (fiber optic current sensor), який дозволяє вимірювати струми до 600 кА, забезпечуючи високу точність вимірювань $\pm 0,1\%$ [27].

2.6 Вимірювання електричної потужності й енергії

У даному випадку, також як і при вимірюванні напруги та струму, для визначення сталих значень електричної потужності, а також енергії, що споживається за відносно тривалий час, як правило, застосовують стандартні вимірювальні прилади. При необхідності (при великих значеннях струму та напруги) використовують відповідні вимірювальні перетворювачі (див. підрозділи 2.4 та 2.5).

Однак, при дослідженнях і випробуваннях електричних та електронних апаратів досить часто необхідно вимірювати потужності й енергії у перехідному режимі. Наприклад, потужність і енергію електричної дуги або силового напівпровідникового приладу. У таких випадках методика вимірювань суттєво відрізняється, необхідно забезпечити одночасне осцилографування струму і напруги і їх фізичне перемноження, що й є основною проблемою вимірювання потужності. Для отримання енергії необхідно додатково забезпечити фізичне інтегрування сигналу потужності.

There are several techniques to measure the instantaneous power value [39]. However, none of them gives satisfactory results in respect to the accuracy to multiply current and voltage, especially when the two phenomena being multiplied are highly different in magnitude. The exception is the use of the Hall Effect to multiply two electrical quantities. This technique is widely used today to measure power, especially at high rates of change in current and voltage, i.e. it provides non-delay operation and ease of use. One of the variants of the power measurement outline with utilization of a Hall generator is given in Figure 2.19.

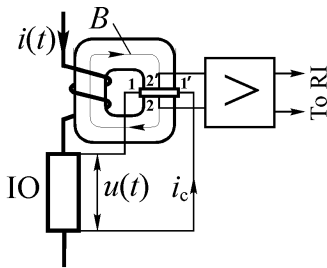


Figure 2.19 – Outline of recording electric power using Hall generator

The Hall generator is placed in the air gap of a magnetic circuit with magnetic flux density B . If the magnetic circuit is non-saturated in the process of recording, the flux density will be proportional to instantaneous value of the current $i(t)$ flowing through the investigate object IO. The current passing between contacts 1-1' i_c is proportional to the voltage drop across the investigate object $u(t)$.

Thus, the Hall electromotive force between contacts 2-2' will be proportional to electric power generated by the investigate object. This voltage is applied to recording instrument RI via the amplifier. If the current flowing through the investigate object is sufficiently high (above 1 kA), the magnetic core is not required to apply; the Hall generator in such case is placed in the vicinity of the current-carrying bus. To measure instantaneous values of electrical energy, the measuring circuit should be supplemented by an integrating circuit with sufficiently long time constant.

2.7 Measurement of Volt-ampere Characteristics

In studying the components of electrical and electronic devices, in particular, electric arc discharges, power semiconductor devices, etc., there is often a need to analyze their current-voltage characteristics. They provide extensive information about the processes taking place in this component and allow analyzing the influence of external factors (circuit parameters, environment) on it.

Існує декілька методів вимірювання миттєвого значення потужності [39]. Проте жоден з них не дає задовільних результатів щодо точності перемноження двох електричних величин струму та напруги, особливо коли два явища, що перемножуються мають велику різницю за величиною. Виключення складає метод перемноження двох величин за допомогою ефекту Холла, який широко використовується у даний час для виміру потужності, особливо при великих швидкостях зміни струму та напруги, тобто забезпечує безінерційність та простоту у використанні. Один з варіантів схеми вимірювання потужності з використанням перетворювача Холла наданий на рис. 2.19.

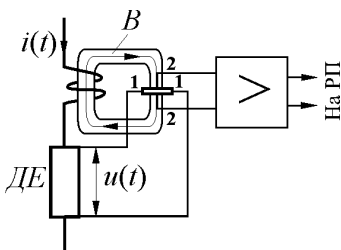


Рисунок 2.19 – Схема вимірювання потужності за допомогою перетворювача Холла

Перетворювач міститься у повітряному зазорі тороїдального сердечника з магнітною індукцією B . Якщо в процесі реєстрації сердечник не насичується, її величина буде пропорційна миттєвому значенню струму, що вимірюється $i(t)$. Через пластину датчика пропускають струм, величина якого пропорційна падінню напруги на досліджуваному елементі $ДЕ$ $u(t)$.

Напруга, що знімається з контактів 2-2, пропорційна потужності, що виділяється в $ДЕ$, через підсилювач подається на реєструвальний прилад. Якщо струм, що протікає в об'єкті, досить великий (порядку одиниць-десятків кілоампер), то сердечник не потрібен, датчик Холла в такому випадку розташовується поблизу струмоведучої шини. Для реєстрації миттєвих значень електричної енергії на вході підсилювача необхідно включити інтегруюче коло з досить великою постійною часу.

2.7 Зняття вольтамперних характеристик

При дослідженні елементів електричних та електронних апаратів, зокрема електродугових розрядів, силових напівпровідникових приладів та ін., часто виникає необхідність аналізу їх вольт-амперних характеристик (ВАХ). Вони дають широкую інформацію про процеси, що відбуваються у даному елементі, і дозволяють аналізувати вплив на нього зовнішніх факторів (параметри кола, навколишнього середовища).

It is known that *volt-ampere* or *current-voltage characteristic* of any element is the dependency the voltage drop across the element vs current passing through the element. Accordingly, a current-voltage characteristic is usually measured by simultaneous recording the current and voltage either directly or with application of appropriate transducers discussed above. There are distinguished *static* volt-ampere characteristics, measured at time-invariable current and voltage of the element, and *dynamic* characteristics measured under changing these quantities in time.

Static characteristic is usually measured by the point-by-point method under steady state current and voltage across the investigate object. The current through the object is changed discretely and corresponding values of the voltage across the object are recorded. In such manner, the curve $U = f(i)$ is plotted according to the points with coordinates I_i, U_i . The change of the current is usually carried out either by variation of the active resistance in the circuit or with the help of additional source in the load circuit. The first method is some simpler in realizing, therefore it is used more frequently, but necessitates to utilize very powerful, which is a grave drawback of this method. Since processes can have statistic behavior, multiple measurements are made for each point.

Measurement of a *dynamic characteristic* requires simultaneous recording both current and voltage drop of the object. In such cases, the oscilloscopes with horizontal and vertical sweep are usually used. The time-changing current with required rate of change is usually provided by the discharge of a capacitor bank connected to the circuit with semiconductor-based or electromechanical switch. The rate of change of the current is adjusted by changing the bank capacitance. In such a way, a set of dynamic characteristics at different rates of change of the current can be measured.

2.8 Measurements of Dielectric Recovery and Post-Arc Current

Dielectric recovery and residual (post-arc) current characterize the properties of the contact gap of a switching device during the critical period of AC circuit interruption, namely immediately after arc current-zero. To date, it has been reliably established that just these parameters determine one of the most important performance of the switching device, its breaking capacity.

Відомо, що вольт-амперна характеристика являє собою залежність падіння напруги на даному елементі від величини струму, що протікає через нього. Отже зняття ВАХ здійснюється одночасною реєстрацією струму та напруги або безпосередньо або з використанням відповідних вимірювальних перетворювачів. Розрізняють статичні ВАХ, зняті при відсутності зміни струму та напруги досліджуваного елементу й динамічні, що знімаються в процесі їх змінення у часі.

Зняття *статичних* характеристик здійснюється при сталих значеннях струму та напруги елементу, що досліджується. Зміна струму у випробному колі здійснюється дискретно і фіксуються відповідні сталі значення напруги на даному елементі і, таким чином, по точках з координатами I_i , U_i будується крива $U = f(t)$. Зміна струму здійснюється або зміною активного опору у колі, або за допомогою додаткового джерела у колі навантаження. Перший спосіб дещо простіше в реалізації, тому на практиці використовується частіше, але вимагає застосування дуже потужних резисторів, що є суттєвим недоліком цього методу. При знятті статичної ВАХ виконується декілька вимірів для кожної точки, тому що процеси можуть носити статистичний характер.

Зняття *динамічних* характеристик потребує одночасного осцилографування струму і напруги елемента, що досліджується. Для цього використовуються осцилографи з розгорткою по горизонталі і вертикалі. Зміна струму з необхідною швидкістю забезпечується розрядом конденсаторної батареї, що підключається в схему за допомогою напівпровідникового або електромеханічного комутатора. Змінюючи ємність батареї, можна керувати швидкістю зміни струму і, таким чином, знімати сімейство динамічних ВАХ при різних швидкостях зміни струму.

2.8 Вимірювання поновлюваної міцності та залишкових струмів

Поновлювана міцність та залишковий струм характеризують властивості міжконтактного проміжку комутаційного апарата у критичний період вимикання електричного кола змінного струму, а саме безпосередньо за переходом струму дуги через нульове значення. На сьогоднішній день достовірно встановлено, що саме ці параметри визначають одну з найважливіших технічних характеристик комутаційного апарата, його вимикальну спроможність.

The dielectric recovery features time-growing the dielectric strength of the residual arc (post-arc) space as the current passes through the zero value after the electric arc has extinguished. The dielectric recovery at this period "resists" the recovery voltage and is defined by the minimal voltage, which is capable to disrupt the post-arc space thereby transfer it to the state of thermal arc plasma, that is, a valuable arc discharge. This property is the basis for all experimental techniques to measure the recovery of dielectric strength. All experimental techniques can be conventionally united into two groups: method of *one-time breakdowns* and method of *repetitive (multiple) breakdowns*. The first method is realized with the circuit shown in Figure 2.20.

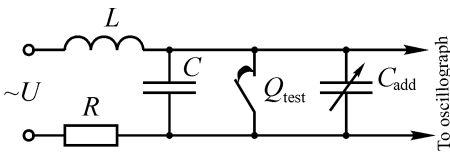


Figure 2.20 – Circuit for measurement of recovery dielectric by single breakdowns

The circuit, supplied from AC source, consists of the following components. It is, first, L , R , C that are the components simulating parameters of the circuit being interrupted by switching

device Q_{test} . Capacitor C_{add} is adjustable capacitance, which ensure required rate of rise of the recovery voltage.

The measurement of the recovery dielectric is carried out as follows. An arc discharge is initiated in the inter-contact gap of the test device, which burns during a few half-cycles. The current-zero moment followed by the arc reignition is recorded by an oscilloscope. The arc discharge is reignites at the instant, when the recovery voltage becomes as high as the dielectric strength of the gap. The measured ignition voltage $U_{ign,1}$ corresponding to instant t_1 will be one of points of the recovery dielectric curve.

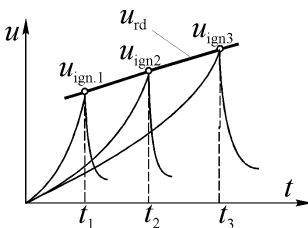


Figure 2.21 – Construction of dielectric recovery curve by single breakdowns

Changing the rate of rise of the recovery voltage with capacitor C_{add} , other points of this curve can be measured in other trials, when the arc reignites at other instants under other voltages. The dielectric recovery curve $u_{BN}(t)$ is constructed from the measured points as shown in Figure 2.21.

The principal drawback of this method is that the recovery strength curve is measured in different experiments in which the conditions may be non-identical.

Поновлювана міцність характеризує ізоляційні властивості міжконтактного проміжку, що утворюються і зростають у часі за переходом струму через нульове значення після згасання електричної дуги. Поновлювана міцність «протистоїть» поновлюваній напрузі та визначається тою мінімальною напругою, що здатна пробити залишковий стовбур електричної дуги й тим самим перевести його в стан термічної електродугової плазми, тобто повноцінного електродугового розряду. На цієї обставині базуються усі методи експериментального визначення поновлюваної міцності, їх можна умовно об'єднати в дві групи: метод *однократних пробойів* та метод *багатократних пробойів*. Перший метод реалізується схемою, що надана на рис. 2.20

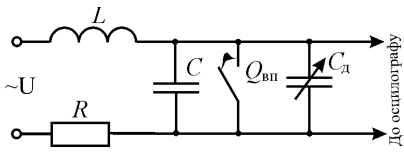


Рисунок 2.20 – Схема реалізації методу однократних пробойів

Схема живиться від джерела змінного струму й містить наступні елементи. Це, по-перше, контур $L-R-C$, який забезпечує параметри електричного кола, яку вмикає досліджуваній комутаційний апарат $Q_{вп}$. C_d – додаткова регульована ємність, яка забезпечує

потрібну швидкість зростання поновлюваної напруги.

Вимірювання поновлюваної міцності відбувається наступним чином. У міжконтактному проміжку досліджуваного апарата створюється дуга, яка існує протягом декількох напівперіодів. За допомогою осцилографа фіксується момент переходу струму через нульове значення, за яким відбувається повторне запалювання дуги. Воно відбувається в той момент, коли поновлювана напруга досягає величини, яка відповідає поновлюваній міцності. Визначивши напругу запалювання $u_{з1}$ і відповідний йому час t_1 , здобудемо одну з точок кривої поновлюваної міцності.

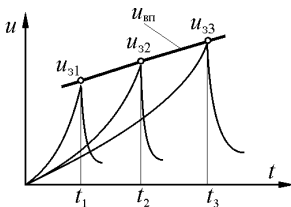


Рисунок 2.21 – Побудова кривої поновлюваної міцності за методом однократних пробойів

Змінюючи швидкість поновлюваної напруги за допомогою додаткової ємності, запалювання дуги буде відбуватися при інших напругах і інших моментах часу. Таким чином в інших досліджах можна одержати інші точки кривої $u_{вп}(t)$, за якими будується крива поновлюваної міцності міжконтактного проміжку, я це показано на рис. 2.21.

Основним недоліком розглянутого методу є те, що крива $u_{вп}(t)$ здобувається за результатом проведення декількох дослідів, умови в яких можуть бути неідентичними.

The multiple breakdowns method enables us to derive a dielectric strength curve at one current-zero crossing. This is carried out by the use of the charge of a capacitor, which discharges through the investigate gap a few times. The circuit realizing this method is shown in Figure 2.22.

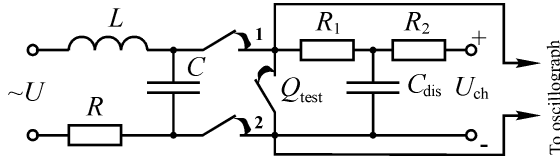


Figure 2.22 – Circuit for measurement of dielectric recovery by multiple breakdowns

In this case, the circuit is also supplied from ac source and has the same parameters L, R, C . As differentiated from the foregoing circuit, this circuit contains three series gaps 1, 2, and Q_{test} , as well as discharge capacitance C_{dis} and, respectively, discharge and charge resistors R_1, R_2 .

At the current-zero instant the arc extinguishes in all gaps. In the process, gaps 1 and 2 separate the investigate gap Q_{test} from the power source. Capacitor C_{dis} is charged from a dc power source U_{ch} and breaks down the gap Q_{test} at certain voltage followed by the voltage fall. This process is iterated several times. The rates of charging and discharging of capacitance C_{dis} is adjusted by resistors R_1 and R_2 , respectively. The curve $u_{BN}(t)$ is plotted on vertexes of resultant oscilloscope trace (point 1, 2 and 3), as shown in Figure 2.23.

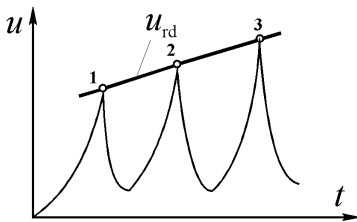


Figure 2.23 – Construction of dielectric recovery curve by the method of multiple breakdowns

The principal drawback of this method is the fact that because of the breakdown, the initial state of the post-arc space is disturbed. The energy is generated in this space, and it is considerably ionized. Hence, its strength measured at subsequent reignitions is determined when the conditions already have some changed. Currently, more advanced circuits have

been developed that ensure reduction of generated energy in residual arc space under reignition. However, it cannot be precluded fully; therefore, dielectric strength curve is usually constructed by the way of combination of both methods [44].

Метод багатократних пробойів дозволяє здобути криву $u_{вп}(t)$ за одним переходом струму через нульове значення. Це досягається використанням заряду ємності, яка декілька раз розряджається через досліджуваний проміжок. Схема, що реалізує даний метод, надана на рис. 2.22.

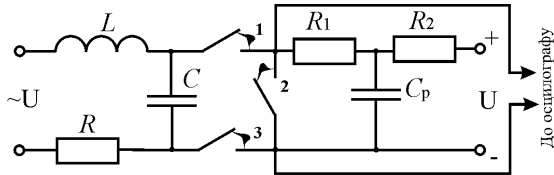


Рисунок 2.22 – Схема реалізації методу багатократних пробойів

У даному випадку схема також живиться від джерела змінного струму і має такі ж параметри R, L, C . На відміну від попередньої схеми, ця схема містить три розриви 1, 2, 3, а також розрядну ємність C_p і, відповідно, розрядний та зарядний резистори R_1, R_2 .

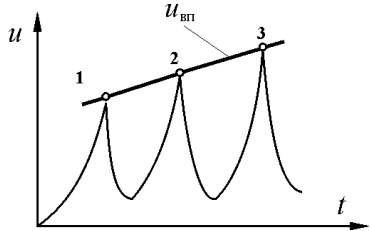


Рисунок 2.23 – Побудова кривої повновольованої міцності методом багатократних пробойів

При переході струму через нульове значення дуга у всіх розривах гасне. При цьому розриви 1 і 3 відокремлюють досліджуваний проміжок 2 від джерела живлення. Ємність C_p заряджається і при деякій напрузі пробиває проміжок 2, за яким відбувається зниження напруги. Потім знову відбуваються підйоми напруги і пробой. Швидкість заряду і розряду ємності C_p регулюється резисторами

R_1 і R_2 . Крива $u_{вп}(t)$ будується по вершинах здобутої осцилограми (точки 1, 2 і 3), рис. 2.23.

Основним недоліком даного методу є те, що внаслідок пробую початковий стан залишкового стовбура дуги порушується. У ньому виділяється енергія, і він значно іонізується. Тому при наступних пробоях повновольована міцність буде визначена вже при декілька інших умовах.

В даний час існують більш досконалі схеми, в яких істотно знижене виділення енергії при пробойі, однак цілком позбутись цього неможливо. Тому при побудові кривої $u_{вп}(t)$, як правило, сполучають обидва методи [44].

Post-arc current is the current flowing through the intercontact gap under action of the recovery voltage after the arc has extinguished in the current-zero crossing. The post-arc current curve is shifted relative to the current-zero level and oscillates with the frequency that follows to the frequency of the transient recovery voltage. Experimental determination of the post-arc currents is of considerable interest in research and testing of switching capability of the apparatus.

However, it should be noted that its measurement involves in significant difficulties because immediately prior to this current, comprising from a few to tens of amperes, a high short-circuit current of 50 Hz (tens of kiloamperes) flows through this gap. Hence, the measured current is less than the let through current, which cannot be measured, by an average of 10^5 times.

There are many techniques of experimental determination of residual currents, but the method based on the use of a non-inductive shunt with the use of a limiting amplifier received the most widespread recognition [44]. The structural diagram of a power circuit with such a measuring system is given in Figure 2.24.

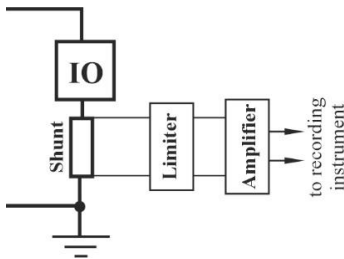


Figure 2.24 – Structural diagram for residual current measurement

The main components of the measuring system are a shunt, a limiter and an amplifier. A distinctive feature of shunts for these purposes is their high (up to 0.2 Ohm) resistance, so flat shunts with increased heat transfer are used. The limiter must to ensure passage of the signal without distortion (i.e., proportional to the measured residual current) when its value is not excess of

the limiting level, and to saturate when short-circuit current passes through the investigate object IO and shunt. The limiting level is chosen depending on the specific measurement conditions, that is, the expected level of residual currents. Both a DC and an AC amplifier can be utilized in the circuit. It is advisable to use an AC amplifier only in those cases when the duration of the short-circuit current, containing an aperiodic component, does not exceed several hundredths of a second. The DC amplifier can be used at any duration of the short-circuit current.

Залишковий струм – це струм, який протікає у міжконтактному проміжку під дією поновлюваної напруги після згасання дуги при проходження струму через нульове значення. Крива залишкового струму зміщена відносно нульової лінії струму і коливається з частотою, яка відповідає частоті перехідної поновлюваної напруги. Експериментальне визначення залишкового струму являє собою чималу цінність при дослідженнях і випробуваннях комутаційної спроможності апаратів.

Проте, слід зазначити, що його вимірювання викликає суттєві труднощі, пов'язані з тим, що йому безпосередньо передує великий струм короткого замикання частоти 50 Гц (десятки кілоампер), в той час як величина залишкового струму лежить у межах від часток ампера до десятків ампер. Отже вимірюваний струм менше за кризний струм, який не підлягає вимірюванню, у середньому у 10^5 разів.

Існує багато методів експериментального визначення залишкових струмів, але найбільш широке визнання отримав метод, заснований на використанні безіндуктивного шунта з застосуванням підсилювача-обмежувача [44]. Принципова схема силового кола з таким вимірювальним пристроєм надана на рис. 2.24.

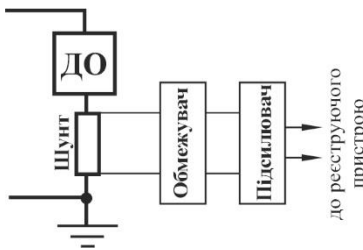


Рисунок 2.24 – Структурна схема вимірювання залишкового струму

Основними елементами вимірювального пристрою є шунт, обмежувач та підсилювач. Відмінною рисою шунтів для цих цілей є їх високий (до 0,2 Ом) опір, тому застосовуються плоскі шунти з підвищеною тепловіддачею. Обмежувач забезпечує проходження без спотворень сигналу, рівень якого нижче за рівень обмеження, тобто пропорційного вимірюваному залишковому струму, і насичуватись при проходженні струму к.з. у досліджуваному об'єкті ДО та шунті. Рівень обмеження обирається в залежності від конкретних умов вимірювання, тобто очікуваного рівня залишкових струмів. В схемі може використовуватись як підсилювач постійного так і змінного струму. Підсилювач змінного струму доцільно використовувати тільки у тих випадках, коли тривалість струму к.з., який містить аперіодичну складову, не перевищує декількох сотих часток секунди. Підсилювач постійного струму може використовуватись при будь-якої тривалості струму к.з.

2.9 Measurement of Non-Electrical Parameters

Magnetic measurements. For a long time the main type of the transducer (sensor) used for magnetic measurements was so-called *induction converter*. The main its component is the *sensing coil*. If all turns of the sensing coil linkage with time-changing magnetic flux $\Phi(t)$, then according to Faraday's law of induction the electromotive force induced by the coil is:

$$e_{sc} = w_{sc} \frac{d\Phi(t)}{dt}, \quad (2.20)$$

where w_{sc} is the number of turns in the coil.

Thus, an electromotive force induced by the sensing coil is proportional to the rate of change of the magnetic flux to be measured. To obtain an oscillograph trace of the magnetic flux, the measuring circuit should be supplemented with an integrating circuit with a sufficiently long time constant.

The main requirements that ensure accuracy of the measurements with an induction converter are as follows. Firstly, the sensing coil must be arranged so that the plane of its turns would be perpendicular to the magnetic flux lines. Secondly, when measuring the magnetic flux in the magnetic flux guide, the sensing coil turns should be located as close as possible to its surface. Therefore, the best variant is the turns is wound directly on a magnetic flux guide or thin-walled frame.

When the winding, exciting the magnetic flux measured, carries DC current, then in steady state conditions the value of this flux will be invariable. Hence, the electromotive force induced by the sensing coil will equal to zero that makes impossible to measure the magnetic flux in steady state conditions. If the magnetic flux is excited by only one magnetizing winding in the magnetic circuit, then it can be measured by the way of stepwise change (switching) of the winding power supply polarity. The change in magnetic flux is recorded by a ballistic galvanometer or fluxmeter connected to the sensing coil. The flux magnitude is found from the following expression:

$$\Phi = C \frac{\alpha_{av}}{2w_{sc}}, \quad (2.21)$$

where C is the instrument constant; α_{av} is average deflection of the instruments' pointer.

2.9 Вимірювання неелектричних параметрів

Вимірювання магнітних величин. Тривалий час основним типом вимірювального перетворювача для вимірювання магнітних величин (магнітного потоку, магнітної індукції) як при змінному, так і при постійному струмі був т.з. *індукційний перетворювач*. Основним його елементом є вимірювальна котушка. Якщо всі витки вимірювальної котушки зчіплюються зі змінюваним у часі магнітним потоком $\Phi(t)$, то відповідно до закону електромагнітної індукції у ній наводиться електрорушійна сила:

$$e_{\text{вк}} = w_{\text{вк}} \frac{d\Phi(t)}{dt}, \quad (2.20)$$

де $w_{\text{вк}}$ – кількість витків вимірювальної котушки.

Таким чином, у вимірювальній котушці наводиться е.р.с., пропорційна швидкості зміни магнітного потоку. Щоб здобути осцилограми магнітного потоку вимірювальний пристрій необхідно доповнити інтегрувальним колом з достатньо великою постійною часу.

Основними вимогами, що забезпечують точність вимірів за допомогою індукційного перетворювача, є наступні. По-перше, вимірювальна котушка повинна розташовуватися таким способом, щоб площа витків була перпендикулярна силовим лініям магнітного поля. І по-друге, при вимірюванні магнітного потоку у магнітопроводі, витки вимірювальної котушки повинні розташовуватися якнайближче до його поверхні; тому їх краще намотувати безпосередньо на магнітопровід або тонкостінний каркас.

При *постійному струмі* в обмотці намагнічування (у сталому режимі) величина магнітного потоку у магнітопроводі буде незмінною. Отже е.р.с. у вимірювальній котушці буде дорівнювати нулю, що робить неможливим виміри магнітного потоку у сталому режимі. При наявності однієї обмотки намагнічування величина незмінного потоку може бути визначена по його зміні при стрибкоподібній зміні полярності джерела живлення. Зміна магнітного потоку в цьому випадку фіксується підключенням до вимірювальної котушки балістичного гальванометра або веберметра. Величина ж магнітного потоку визначається у відповідності до наступного виразу:

$$\Phi = K \frac{\alpha_{\text{сер}}}{2w_{\text{вк}}}, \quad (2.21)$$

де K – постійна приладу; $\alpha_{\text{сер}}$ – середнє відхилення стрілки приладу.

When the winding (or several windings), exciting the magnetic flux measured, carry AC sine current, then its amplitude value in steady state conditions can be found from the well-known expression:

$$\Phi_m = \frac{e_{sc}}{4.44fW_{sc}}, \quad (2.22)$$

where f is the frequency of time-changing magnetic flux; Φ_m is the amplitude value of the flux.

Hence, the amplitude value of the flux being measured is proportional to the electromotive force of the sensing coil, which can be measured by a standard millivoltmeter. In this case, application of digital voltmeter with high input impedance is most preferable for the purpose to mitigate the error.

The sensing coil can also be used to measure the magnetic flux in transient conditions. In this case, the same circuit can be used as for current measurement with a Rogowsky coil (see Figure 2.13). In this case, the electromotive force of the coil is proportional to the rate of change of the magnetic flux. To obtain the magnetic flux time diagram, the circuit must also contain an integrator with a sufficiently long time constant. The recording device in this case can also be an oscilloscope or a digital recorder.

Along with the application of sensing coils, the Hall generator is frequently applied for magnetic measurements. In the process, the same circuit can be used as for current measurements (see Figure 2.15). A time-invariable current is passed between the electrodes 1-1' of Hall generator, then the Hall's electromotive force will be proportional to the value of the magnetic flux density.

Mechanical measurements. Switching (make-break) operations in power electric circuits is mainly carried out by electromechanical switching devices, therefore, in one way or another, it is related to various types of mechanical movement. It should also be noted between the mechanical movements of the apparatus components and the switching operations under current exists an inseparable causal-and-consecutive relationship. That is why during researches and testing that require to ascertain the functional characteristics of the devices, along with the analysis of the switching processes, there is a need to study the movement parameters, as well as the force interaction of the apparatus components.

Якщо вимірюваний магнітний потік утворюється обмоткою (або декількома обмотками) зі змінним синусоїдальним струмом, то його амплітудне значення може бути визначено за добре відомим співвідношенням:

$$\Phi_m = \frac{e_{\text{ВК}}}{4.44 f W_{\text{ВК}}}, \quad (2.22)$$

де f – частота змінного струму.

Таким чином, амплітудне значення магнітного потоку Φ_m буде пропорційним е.р.с. вимірювальної котушки, яка може бути виміряна стандартним мілівольтметром. Для зменшення похибки у даному випадку краще використовувати цифровий вольтметр з великим вхідним опором.

Вимірювальна котушка може бути використана також і для вимірювання магнітного потоку у перехідних режимах. У такому випадку може бути використана така ж сама схема, що й для вимірювання струму з використанням котушки Роговського (див. рис. 2.13). У цьому випадку е.р.с. вимірювальної котушки пропорційна швидкості змінення магнітного потоку. Для отримання осцилограми магнітного потоку схема також повинна містити інтегратор з достатньо великою постійною часу. Реєструвальним приладом уданому випадку також може бути осцилограф або цифровий реєструвальний пристрій.

Поряд з використанням вимірювальних котушок при вимірюванні магнітної індукції досить часто використовують перетворювач Холла. При цьому, може бути використана така ж сама схема, що й для вимірювання струму (див. рис. 2.15). Між електродами 1-1' перетворювача пропускається постійний по величині струм, тоді е.р.с. Холла буде пропорційна величині індукції.

Вимірювання механічних параметрів. Комутація струму у силових електричних колах здійснюється переважно електромеханічними комутаційними апаратами, отже так чи інакше пов'язана з різноманітними видами механічного руху. Слід також зазначити, що між механічними переміщеннями частин апарату та комутацією струму існує нерозривний причинно-наслідний зв'язок. Саме тому при дослідженнях та випробуваннях, які потребують з'ясування функціональних характеристик апаратів, поряд з аналізом комутаційних процесів виникає необхідність вивчення параметрів руху, також силової взаємодії елементів апарата.

The range of movements to be registered during certain studies can be very wide, namely, from several micrometers to several centimeters. For example, in studying the bounce of contacts, there is need to measure micro-displacements (10^{-6} – 10^{-4} m), while in studying the kinematics of their movement, relatively large movements (10^{-3} – 10^{-1} m). The initial velocities in the process of closing and opening the contacts can be very small (about 10^{-6} – 10^{-7} m/s), while the final, on the contrary, very large (about 10^2 m/s), and these values must be measured with a sufficiently large accuracy.

Measuring the full linear or angular travel, as well as the average linear and angular velocity, usually does not cause major problems. However, during the research and testing of electromechanical devices, it is frequently necessary to solve the problems that are more complex. For example, record the time diagrams and instantaneous values of travels, velocities and accelerations of the apparatus' movable components.

High-speed video recording methods are quite effective for direct observation and recording of the process of moving open (i.e., visible) parts of the apparatus. In addition, to determine the kinematic characteristics of the movement of parts of the apparatus, various types of *mechanic-electric transducers* are used which convert the movement into an electrical signal (see subsection 2.3). Resistive, inductive, capacitive, photoelectric, strain-gauge, and other converters have become the most widespread in the practice of research and testing of apparatus.

Resistive (variable-resistive) transducers can be used to record both linear and angular travels. As already noted, the operation of such transducers is based on change in pure resistance and, accordingly, a voltage drop across tunable resistor under moving the slider having kinematic joint with investigate object (see subsection 2.3).

The main advantage of resistive transducers is the linear dependence of the output signal on the travel magnitude. Moreover, the output signal, as a rule, does not require amplification and can be directly applied to the input of the oscilloscope. Disadvantages of resistive transducers are as follows. First and foremost, they produce an additional load on the element under investigation, although the error is usually insignificant. In addition, the resistive transducer frequently requires an intricate joint with the element under investigation. Finally, at high speeds, brush vibrations and disturbance of transitional resistance between the slider and resistor are possible.

Діапазон переміщень, які підлягають реєстрації при тих чи інших дослідженнях може бути дуже широким – від декількох мікрометрів до декількох сантиметрів. Наприклад, при дослідженні вібрації контактів потрібно вимірювати мікропереміщення (10^{-6} – 10^{-4} м), при дослідженні кінематики їх руху – відносно великі переміщення (10^{-3} – 10^{-1} м). Початкові швидкості в процесі замикання та розмикання контактів можуть бути дуже малими (порядку 10^{-6} – 10^{-7} м/с), а кінцеві, навпаки, дуже великими (порядку 10^2 м/с), причому ці величини повинні бути виміряні з достатньо великою точністю.

Вимірювання повного лінійного або кутового переміщення, а також середньої лінійної або кутової швидкості, як правило, не викликає серйозних проблем. Однак, при дослідженнях і випробуваннях електромеханічних апаратів найчастіше доводиться вирішувати більш складні задачі, наприклад: здобувати осцилограми і визначати миттєві значення переміщень, швидкостей і прискорень їх рухомих частин.

Для безпосереднього спостереження та реєстрації процесу переміщення відкритих, тобто видних частин апарата, досить ефективними є методи швидкісного відеозапису. Окрім цього, для визначення кінематичних характеристик руху частин апарата використовують різні види резистивних та механо-електричних вимірювальних перетворювачів, які перетворюють переміщення в електричний сигнал (див. підрозділ 2.3). Широке розповсюдження у практиці досліджень та випробувань апаратів набули резистивні, індуктивні, ємнісні, ємнісно-індуктивні, тензометричні, фотоелектричні та інші перетворювачі.

Реостатні (потенціометричні) перетворювачі можуть використовуватися для реєстрації як лінійних, так і кутових переміщень. Як вже зазначалось, принцип дії таких перетворювачів базується на змінні активного опору та, відповідно, падіння напруги на резисторі в процесі руху повзунка, який має кінематичний зв'язок з досліджуванним елементом (див. підрозділ 2.3).

Основною перевагою реостатних перетворювачів є лінійна залежність вихідного сигналу від величини переміщення. Причому, вихідний сигнал, як правило, не вимагає підсилення і може безпосередньо подаватися на вхід осцилографа. До недоліків реостатних перетворювачів можна віднести, насамперед, створення додаткового навантаження на елемент, що досліджується, проте похибка, як правило, незначна. Крім того, реостатний перетворювач найчастіше вимагає складного зв'язку з досліджуванним елементом; при великих швидкостях можливі вібрації щітки і порушення перехідного опору між повзунком та резистором.

Capacitive transducers are also have application to measure mechanical travels. Unlike resistive transducers, they produce relatively small load on the investigate object, but provide measurement only relatively small travels. The main component of a capacitive transducer is a coaxial-cylinder capacitor (book capacitor) with variable capacitance usually made of an insulating material with a high dielectric constant. The transducer capacitance, as a rule, changes insignificantly; therefore, measuring circuits with capacitive transducers are mostly designed by resonant principle that lead to its complication.

Inductive transducers are used to measure mechanical travels as well. The main their advantages are simplicity and convenience for application, but their sensitivity is highly dependent on the air gap value. In measuring large travels, it necessary to use additional converting devices. Essential drawbacks of inductive transducers are their sensitivity to extraneous fields and nonlinearity of the characteristic that necessitates previous calibration of the transducer.

Photoelectric transducers also in some cases can be used to measure mechanical travels. For example, to measure the velocity of electrical arc, the use of photoelectric sensors is highly effective experience. However, it should be pointed out here that its application involves significant complication of the measuring system. In this case, the object under research should contain additional appliances to reflect or transmit light; in some cases, it is necessary to have special lighting schemes etc.

Induction transducers, along with magnetic measurements, are often used to measure velocity of apparatus' components. Its main component, sensing coil placed at the investigate object or kinematically conjunct with it, moves in a uniform magnetic field; so the electromotive force induced by the coil is proportional to the velocity of the object movement. To determine travel or acceleration with the induction converter, its output signal should be either integrated or differentiated, respectively.

Strain-gauge transducers refer to mechanic-to-electric resistive measuring converting devices. They convert the relative deformation of the elastic element whereupon are installed into an electrical signal. The principle of operation of strain gauge transducers is based on the phenomenon of the strain effect, which consists in changing the electrical resistance of the conductive material when it is mechanically deformed.

Ємнісні перетворювачі також використовуються для вимірювання механічних переміщень. На відміну від резистивних, ємнісні перетворювачі створюють невелике навантаження на елемент, що досліджується, але здатні вимірювати лише відносно невеликі переміщення. Основним елементом ємнісного перетворювача є, як правило, циліндричний конденсатор змінної ємності. Між обкладками конденсатора розміщується втулка, виконана з ізоляційного матеріалу з великою діелектричною проникністю. Ємність конденсатора змінюється незначно, тому схеми з ємнісними перетворювачами будують, як правило, на резонансному принципі, що веде до її ускладнення.

Індуктивні перетворювачі також широко використовуються для вимірювання механічних переміщень. Основною їх перевагою є простота та зручність у застосуванні, проте їх чутливість суттєво залежить від змінюваного зазору. Тому при вимірі великих переміщень необхідно мати додаткові перетворювальні пристрої. Суттєвим недоліком індуктивних датчиків є їх чутливість до зовнішніх полів і нелінійність характеристики, що вимагає попереднього тарування перетворювача.

Фотоелектричні перетворювачі також можуть бути застосовані у деяких випадках для вимірювання механічних параметрів. Наприклад, для вимірювання швидкості руху електричної дуги використання саме фотоелектричних перетворювачів вважається надзвичайно ефективним. Проте, слід зазначити, що їх використання значно ускладнює вимірювальний пристрій. У цьому випадку досліджуваний елемент повинен містити додаткові елементи для відбиття або пропускання світла; у деяких випадках потрібно мати спеціальну схему освітлення та ін.

Індукційні перетворювачі, поряд з вимірюванням магнітних параметрів, досить часто використовують для вимірювання швидкості руху елементів апаратів. Вимірювальна котушка, розміщена на досліджуваному об'єкті або кінематично зв'язана з ним, рухається в однорідному магнітному полі. Отже, е.р.с., що наводиться в ній, пропорційна швидкості руху об'єкта. Для визначення переміщення або прискорення за допомогою індукційного перетворювача здобутий сигнал необхідно відповідно проінтегрувати або продиференціювати.

Тензометричні перетворювачі відносяться до механо-електричних резистивних перетворювачів. Вони здійснюють перетворення відносної деформації пружного елемента, на якому вони встановлені, в електричний сигнал. Принцип дії тензометричних перетворювачів базується на явищі *тензоефекту*, який полягає у змінненні електричного опору провідникового матеріалу при його механічній деформації.

The strain gauge transducer is a high-resistive wire with a diameter of 0.02–0.04 mm by a length of up to several hundred millimeters, located with loops or a grid on a substrate made of elastic material, which is glued to the investigate object surface.

Strain gauge transducers, first and foremost, are used to determine mechanical stresses in the object under study by measuring the amount of deformation caused by this stress. It can also be used to measure mechanical movements, but requires the conjunction of elastic elements with the moving part of the apparatus, which necessitates the use of additional appliances.

The main advantages of strain gauge transducers are high sensitivity and measurement accuracy, as well as absence of lag and hysteresis. Significant disadvantages of converters are sensitivity to magnetic fields and that multiple use of one converter is impossible.

Along with the considered above methods, other methods may be sufficiently effective. For example, in some specific cases *radar-tracking methods* can be applicable as well. It should be noted however that in this case sophisticated equipment is required to generate microwave waves and convert signal. This method has essential advantage, namely, the absence of a mechanical joint between the measuring circuit and the investigate object.

One of the characteristic features of electromechanical switching devices is the presence of force (including impact) interactions of contact elements, as well as movable and fixed parts of the driving electromagnetic mechanisms. This necessitates to determine the parameters of the force and impact interactions of the apparatus elements.

The main measuring techniques for static forces and torques in the process of research and testing of electrical apparatus are the use of mechanical elastic transducers. The simplest of them are spring load gauge, which are widely used in determining the contact loads of the main and auxiliary contacts of switching devices. The contact load of the contact connections, which is provided by the fastening parts (bolts, screws), is set and monitored using torque indicating wrenches or calibrated screwdrivers.

The experimental determining techniques for the parameters of impact interactions are based on the same principles as are conventionally used to measure forces, torques, as well as travels, velocities and accelerations.

Тензометричний перетворювач являє собою високоомний дріт діаметром 0,02–0,04 мм довжиною до декількох сотень міліметрів, розташований петлями або решіткою на підложці з еластичного матеріалу, яка наклеюється на поверхню досліджуваного об'єкту.

Тензометричні перетворювачі, по-перш за все, використовуються для визначення механічних напруг у досліджуваному об'єкті, вимірюючи величину деформації, яка викликана цією напругою. Він також може бути використаний для вимірювання механічних переміщень, але потребує зв'язку пружних елементів з рухомою частиною апарата, що викликає необхідність використання додаткових пристроїв.

Основними перевагами тензометричних перетворювачів є висока чутливість і точність вимірювання, а також безінерційність та відсутність гістерезису. Суттєвими недоліками перетворювачів є чутливість до магнітних полів та неможливість багатократного використання одного перетворювача.

Поряд з розглянутими методами не можна скидати з рахунків також *радіолокаційні методи*, хоча при цьому потрібна складна апаратура для генерації НВЧ-хвиль і перетворення сигналу. У ряді випадків цей метод може бути ефективним; істотною його перевагою є відсутність механічного зв'язку приладу з досліджуванним елементом.

Однією з характерних особливостей електромеханічних комутаційних апаратів є наявність силових, у тому числі й ударних взаємодій контактних елементів, а також рухомих та нерухомих частин привідних електромагнітних механізмів. Це викликає необхідність визначення параметрів силових та ударних взаємодій елементів апарату.

Основними методами вимірювання статичних сил та моментів сил в процесі досліджень та випробувань електричних апаратів є використання пружних перетворювачів. Найпростішими з них є пружинні динамометри, які широко використовуються при визначенні контактних натисень головних та допоміжних контактів комутаційних апаратів. Контактне натиснення контактних з'єднань, яке забезпечується кріпильними деталями (болти, гвинти) встановлюється та контролюється за допомогою моментних індикаторних ключів або тарованих викруток.

Методи експериментального визначення параметрів ударних взаємодій базуються на тих самих принципах, що й використовуються за звичаєм для вимірювання сил, моментів сил, а також переміщень, швидкостей та прискорень.

In using these techniques to determine the parameters of impact interactions, one should pay attention first to that the processes under study are short-term; because of this there are some features to apply the considered transducers. For example, it should be taken into account that the propagation of stress waves in the investigate object has own features, which can cause signal distortion. It should be taken into account also own and induced shock interactions, electric erosion processes on contacts, etc. [43].

Thermal measurements. The necessity to measure thermal parameters arises in researching thermal behavior of electrical and power electronic apparatus or some their components, as well as in the thermal testing, namely, temperature-rise tests at the nominal load conditions (load testing), and short time withstand current tests in faulty conditions. The outcomes of such researches and tests are of vital importance because they define the correctness of the engineering and designing decisions in the development process, as well as the quality of the apparatus being produced. Therefore, thermal measurements have received much attention.

The main objects of thermal (mainly temperature) measurements of electrical and power electronic apparatus are current-carrying parts, contact connections (connectors), switching contacts, windings, components for cooling power semiconductor devices, insulation details, etc. The range of temperature measurements in the most cases of researches and tests of apparatus is relatively small (usually from 0 to 300°C). However, higher temperatures take place in the vicinity of the arc column and within it. Along with steady state conditions, unsteady or quasi-steady state conditions also take place in electrical and power electronic apparatus. In such cases there is need to use special measuring means. In some cases, the temperature measurements must be taken remotely. All this facts predefine a wide variety of instrumentation and techniques for temperature measurements.

According to the manner to perceive temperature from a heated body, all measuring instruments may be conventionally separated into two types: contact-based and contactless-based ones. The following types of thermometers and thermal indicators represent the contact-based devices.

Liquid thermometers (mercury and non-mercury). These devices have many modifications and cover the measurement range from -30 to +500°C. They are usually applied for visual determining the temperature, but also enables distance transmission of a signal if sensors-transducers measuring the liquid level in capillaries or tubes (e.g., capacitive transducers) are used.

При використанні цих методів для визначення параметрів ударних взаємодій, треба звертати увагу у першу чергу на короткочасність процесів, внаслідок чого з'являються деякі особливості використання розглянутих перетворювачів. Наприклад, враховувати особливості розповсюдження ударних хвиль у досліджуваному об'єкті, внаслідок чого можуть з'являтися спотворення сигналів; враховувати власні та наведені ударні взаємодії, електроерозійні процеси на контактах та інше. [43].

Вимірювання теплових параметрів. Необхідність вимірювання теплових параметрів виникає при дослідженнях теплових режимів електричних та електронних апаратів або окремих їх елементів, а також випробуваннях апаратів на нагрів у номінальному режимі (навантажувальних випробувань) та на термічну стійкість в режимі короткого замикання. Результати цих досліджень та випробувань надзвичайно важливі, оскільки визначають доцільність конструкторських рішень у процесі ДКР, а також якість апаратів, що виробляються. Тому вимірюванням теплових параметрів (головним чином температури) приділяється велика увага.

Основними об'єктами теплових (температурних) вимірювань електричних та електронних апаратів є струмоведучі шини, контактні з'єднання, комутуючі контакти, обмотки, охолоджувальні елементи силових напівпровідникових приладів, ізоляційні деталі і т. д. Межі вимірюваних температур у переважній більшості досліджень та випробувань апаратів відносно невеликі (0...300°C). Однак, в області утворення електродугового розряду та у самому стволі дуги мають місце більш високі температури. Поряд зі стаціонарними процесами в електричних та електронних апаратах мають місце і нестаціонарні (квазістаціонарні) процеси, дослідження яких вимагає спеціальних вимірювальних засобів. Можуть бути також і умови, коли вимірювання температур повинні проводитися дистанційно. Все це визначає множину вимірювальних приладів і методик вимірювання температур.

За способом сприйняття температури від нагрітого тіла усі існуючі прилади й методи можна умовно розділити на два великі групи: контактні і безконтактні. До контактної групи відносяться наступні основні термометри та термоіндикатори:

Термометри рідинні (ртутні й не ртутні). Існує множина модифікацій, які охоплюють діапазон вимірювань від -30 до + 500°C. За звичаєм це візуальні прилади, однак допускають й дистанційну передачу сигналу, якщо застосовувати датчики-перетворювачі вимірювання ріднини в капілярах або трубках (наприклад, ємнісні перетворювачі).

Nevertheless, liquid thermometers are mainly used to measure the temperature in the rooms where the tests are performed. Liquid thermometers are practically not applicable for temperature measurements of current-carrying parts because of poor contact with a solid surface.

Filled-type thermometers (gas-filled and steam-filled) convert the thermal expansion into the deformation of elastic elements with a pointer indicator. There are also many modifications for temperature measurement in the range from -160 to 600°C . The readings of these type devices can be converted into an electrical signal. Their application area is practically the same as that of liquid thermometers.

Resistance thermometers are based on the temperature dependence of the resistance of conductor and semiconductor materials. The operating temperature of these type instruments ranges from -200 to $+600^{\circ}\text{C}$. Their main component is a temperature-sensitive resistor (thermistor) made of materials with a high resistance temperature coefficient. There are thermistors with negative temperature coefficient of resistance and positive one called *posistors*. The principal advantages of resistance thermometers are small dimensions, minor delay, high sensitivity, etc. Their drawbacks are nonlinearity and large spread of the temperature characteristics for one batch of the devices, and others.

Thermoelectric thermometers are based on the *thermoelectric effect*, i.e. the generation of *electromotive force (thermal emf)* when the contact of two dissimilar materials are heated. Thus, their main component is the thermoelectric transducer usually called *thermocouple*, which represents two dissimilar metal wires jointed by means of welding or soldering. Thermoelectric thermometers enable to measure sufficiently high temperatures (for example, a tungsten-rhenium thermocouple can be used to measure temperatures up to 2500°C).

The most extensive application has received such pairs of metal as chromel-alumel, chromel-copel, and copper-constantan. The chromel-copel thermocouple possesses the highest sensitivity (0.08 mV/K). Typical circuit diagram for temperature measurements with chromel-copel thermocouples is shown in Figure 2.25.

Рідинні термометри застосовуються, головним чином, для виміру температури приміщень, де проводяться випробування. Для вимірювання температури струмоведучих частин використовувати рідинні термометри важко через поганий контакт з поверхнею твердого тіла.

Термометри манометричні (газові, парові) здійснюють перетворення теплового розширення робочого середовища у деформацію пружних елементів зі стрілковим індикатором. Також існує багато модифікацій для вимірювання температури в діапазоні від -160 до 600°C . Існує можливість перетворення їх показань в електричний сигнал. Область використання практично та ж, що й у рідинних термометрів.

Термометри опору базуються на температурній залежності опору провідникових та напівпровідникових матеріалів. Робочий діапазон температур складає від -200 до $+600^{\circ}\text{C}$. Основним елементом термометра є терморезистор, який виготовляється з матеріалів, які мають великий температурний коефіцієнт опору. Існують терморезистори з негативним температурним коефіцієнтом опору і позитивним (позистори). Основними перевагами термометрів опору є малі габарити, мала інерційність, висока чутливість та інші. До недоліків слід віднести: нелінійність та великий розкид температурних характеристик для однієї партії приладів та інші.

Термоелектричні термометри базуються на термоелектричному ефекті, тобто виникненні термо-МРС при нагріванні контакту з двох різнорідних матеріалів. Отже основним елементом термометра є термоелектричний перетворювач або *термопара*, яка являє собою два різнорідних провідники, з'єднаних зварюванням або паянням. Термоелектричні термометри дозволяють вимірювати температури до дуже високих значень (наприклад, вольфрам-ренієва термопара може використовуватись для вимірювання температур до 2500°C).

Найбільше широке поширення набули такі пари провідників: хромель-алюмель, хромель-копель, мідь-константан. Найбільше високу чутливість мають хромель-копелеві термопари ($0,08$ мВ/К). Схема вимірювання температури за допомогою термопар, надана на рис. 2.25.

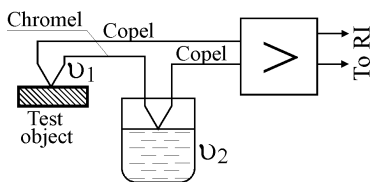


Figure 2.25 – Outline for temperature measurements with thermocouples

measuring signal, equal total thermal emf, will be proportional to the difference between electromotive forces of hot and cold junctions (in this case it will be proportional to the temperature of investigate object in $^{\circ}\text{C}$). The output signal via dc amplifier is applied to a recording instrument with a high input impedance (digital voltmeter, oscillograph).

The main advantages of thermoelectric thermometers are as follows. Firstly, they provide linear characteristic; secondly, they have high sensitivity; and finally, they do not require a power supply. Their principal drawback is the low power of the output signal; therefore, it is necessary to use dc amplifiers.

As already noted, besides contact-based methods, there are also wide variety of contactless-based techniques for temperature measurements. The main distinctive feature that define their main advantage is the absence of a thermally sensitive element, that is, a temperature sensor. The research object itself plays this role. There are two varieties of contactless-based methods, *active* and *passive*. *Laser-based temperature measurements* refer to active (with external sounding) methods based on the analysis of the temperature-dependent properties of the heated object surface. Passive methods are the ones based on the analysis of the physical properties of electromagnetic emission generated by heated bodies. Devices in which these methods are used are called pyrometers.

Pyrometers. There are two types of pyrometers, ones of total radiation and spectral. In *total radiation pyrometers*, the temperature is determined by means of measuring the integral (total) energy of electromagnetic radiation emitted by a certain area. There are two basic classes of total radiation pyrometers:

- *radiative pyrometers* based on the dependence of radiant energy from the temperature described by the Stefan-Boltzmann law;
- *luminance pyrometers* based on the dependence of spectral luminance from temperature according to the Planck's and Wien's laws.

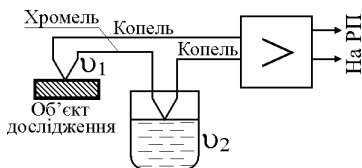


Рисунок 2.25 – Схема вимірювання температури за допомогою термопар

Одна з термопар розташована на об'єкті, що досліджується (гарячий спай), друга – у середовищі з заздалегідь відомою температурою (холодний спай). Частіш за все таким середовищем є судина, в якій знаходиться суміш льоду з водою, температура якої складає 0°C . При цьому,

термо-е.р.с. буде пропорційною різниці, у даному випадку температурі за Цельсієм об'єкта, що досліджується. Вихідний сигнал, тобто термо-е.р.с. через підсилювач постійного струму подається на реєструвальний прилад з великим входним опором (цифровий вольтметр, осцилограф).

До переваг термоелектричних термометрів можна віднести лінійність характеристики, високу чутливість, не потрібно джерело живлення. Основним їх недоліком є мала потужність вихідного сигналу, тому необхідно використання підсилювачів постійного струму.

Поряд контактними методами існує також велике різноманіття безконтактних методів вимірювання температури. Головною особливістю, що визначає їх основну перевагу, є відсутність термочутливого елемента, тобто датчика температури. Цю роль грає сам досліджуваний об'єкт. Існує два різновиди безконтактних методів, *активні* та *пасивні*. До активних (із зовнішнім зондуванням) належать *методи лазерної термометрії*, в які ґрунтуються на аналізі температурно залежних властивостей поверхні нагрітого об'єкту. До пасивних належать методи, що ґрунтуються на аналізі фізичних характеристик електромагнітного випромінювання, що генерується нагрітими тілами. Пристрої, в яких використовуються ці методи, отримали назву пірометри.

Пірометри. Існує два різновиди пірометрів: енергетичні та спектральні. В *енергетичних пірометрах* використовується принцип вимірювання температури по інтегральній (повній) енергії електромагнітного випромінювання, що випромінюється деякою площинкою. Існує два основних класи енергетичних пірометрів:

- *радіаційні*, засновані на залежності енергії випромінювання від температури, що описується законом Стефана-Больцмана;
- *яскравісні*, засновані на залежності спектральної яскравості від температури відповідно до законів Планка і Вина.

The operation of the so-called *spectral distribution pyrometers* is based on the analysis of the spectral distribution of the electromagnetic radiation density (i.e., the intensity of radiation in different spectral ranges). Typical representatives of spectral pyrometers are *thermal imaging devices (thermal imagers)* operating in the infrared range

Essential advantages of pyrometers are:

- the ability to measure high temperatures (for example, the temperature characteristics of the arc column);
- the possibility to study quick-occurring thermal processes, because unlike the temperature sensing devices considered above, the pyrometers practically have not time delay;
- the possibility of determining the total temperature field of the entire object and its visual observation.

Essential disadvantages of pyrometers are the following:

- the relatively large errors, so they are unsuitable for accurate temperature measurements and can be used mainly for the qualitative evaluation of temperatures and temperature fields;
- the reaction on thermal noises from extraneous thermal sources.

Nevertheless, such methods have found application in the practice of testing electrical equipment. In accordance with the requirements of the regulatory document approved by the Ministry of Fuel and Energy of Ukraine, the norms of electrical equipment testing provide for thermal imaging diagnostics for the state of all types electrical equipment [8]. Thermal imaging diagnostics is based on the fact that the presence of certain types of defects in high-voltage equipment causes a change in the temperature of the defective elements and, as a result, a change in the intensity of infrared radiation.

In general, thermal image diagnostics enables to solve such problems that would be impossible without it, namely.

- mass-inspection of a huge amount of electrical equipment with one infrared camera during the preparation period for the autumn-winter load maximum;
- possibility to identify equipment and their components being in a pre-faulty state, such as contact joints, current transformers, coupling capacitors, valve-type arresters and overvoltage limiters;

Дія *спектральних пірометрів* заснована на інтенсивності випромінювання в різних спектральних діапазонах. Типовими представниками спектральних пірометрів є тепловізійні пристрої (тепловізори), що функціонують в інфрачервоному діапазоні.

Істотними перевагами пірометрів є:

- можливість вимірювання високих температур (наприклад, температурні характеристики стовбура електричної дуги);

- можливість вивчення теплових процесів, що протікають швидко, тому що на відміну від розглянутих вище датчиків температури, практично безінерційні.

- можливість визначення повного температурного поля всього об'єкта і його візуального спостереження.

До недоліків пірометрів слід віднести відносно високі похибки, тому вони застосовуються, головним чином, для якісної оцінки температур і температурних полів. Іншим їх недоліком є те, що вони реагують та теплові на теплові перешкоди від інших джерел тепла. Але слід зазначити, що цей напрям вимірювальної техніки в останній час набув широкого розвитку.

Відповідно до вимог нормативного документа, затвердженого Мінпаливенерго України, нормами випробувань електрообладнання передбачено виконання *тепловізійного контролю* стану електрообладнання всіх типів [8]. Тепловізійний контроль базується на тому, що наявність деяких видів дефектів високовольтного обладнання викликає зміну температури дефектних елементів і, як наслідок, зміну інтенсивності інфрачервоного випромінювання.

Загалом тепловізійний контроль дозволяє вирішувати такі завдання, які без неї були б неможливі, а саме.

- це масове обслідування великого об'єму електроустаткування одною тепловізійною камерою за період підготовки до осінньо-зимового максимуму навантаження.

- виявлення апаратів та їх елементів, що знаходяться у передаварійному стані (дефектні контактні з'єднання, трансформатори струму, конденсатори зв'язку, вентиляльні розрядники та обмежувачі перенапруг).

- possibility to detect such defects that cannot be detected by any other methods, e.g. local temperature-rise of power transformer tank constructive components, heating of jointing bolts in supporting metal constructions of busducts or overloads of certain components of valve-type arresters 110 kV and above and so forth.

Laser-based thermal measurements is a new trend in temperature measuring techniques. In contrast to optical pyrometer measurements, thermal self-radiation of the investigate object is not used in this case. The operation of the measuring devices is based on the analysis of the temperature-dependent optical parameters of the object with the help of a probing laser beam, such as (for example, for solids):

- real and imaginary parts of the total refractive index;
- concentration of free charge carriers;
- geometry of the surface micro-relief and other parameters.

Laser thermometer can measure the temperature of flame, explosions, gas-discharge plasma, solids and liquids. Electromagnetic interferences, high electrical potentials, chemically active media, vibration and other factors, that make it difficult to measure temperatures by contact methods, do not affect the laser beam. The laser beam has a number of distinctive features, such as, wavelength, polarization, propagation direction, intensity modulation, which enable us to recognize it against the background of optical interference.

The use of laser thermometers eliminates the problem of thermal contact unreliability of the sensing element with the object under study: the presence of a contact between the probing beam and the object to be studied is literally obvious. The variety of phenomena occurring during the interaction of light with a solid made it possible to create both wide-range methods with low sensitivity, and highly sensitive methods with a narrow range of measured temperatures, and sometimes combine in one method a wide range of temperature ranges and high sensitivity (1–2 orders of magnitude higher than that of thermocouples).

- виявлення таких ефектів, які не можуть бути виявлені іншими методами, наприклад перегрів конструктивних елементів баків силових трансформаторів, нагрів з'єднувальних болтів у металевих конструкцій, що підтримують шинопроводи, або окремих елементів вентиляційних розрядників 110 кВ і вище та інші задачі.

Лазерна термометрія – це новий напрямок у техніці температурних вимірювань. На відміну від оптичної пірометрії, власне теплове випромінювання досліджуваного об'єкта в даному випадку не використовується. Дія вимірювальних пристроїв ґрунтується на аналізі температурно залежних оптичних параметрів об'єкта за допомогою зондувального лазерного пучка. Такими параметрами (наприклад, для твердих тіл) є:

- дійсна та уявна частини комплексного показника заломлення;
- концентрація вільних носіїв заряду;
- геометрія мікрорельєфу поверхні та інші параметри.

Методами лазерної термометрії може вимірюватися температура полум'я та вибухів, газорозрядної плазми, твердих тіл та рідин. Лазерний пучок не схильний до впливу електромагнітних перешкод, високих електричних потенціалів, хімічно активних середовищ, вібрації та інших факторів, що ускладнюють вимірювання температур контактними методами. Лазерний пучок має ряд характерних ознак (довжина хвилі, поляризація, напрямок поширення, модуляція інтенсивності), що дозволяють достовірно розрізнити його на фоні оптичних перешкод.

Використання лазерної термометрії повністю усуває проблему ненадійності теплового контакту чутливого елемента з об'єктом, що досліджується: наявність контакту зондуючого пучка з досліджуваним об'єктом у буквальному сенсі очевидна. Різноманітність явищ, що відбуваються при взаємодії світла з твердим тілом, дозволило створити як широкодіапазонні методи з невисокою чутливістю, так і високочутливі методи з вузьким діапазоном температур, що вимірюються, а іноді об'єднувати в одному методі широту температурного діапазону і високу чутливість (на 1–2 порядку більше, ніж у термопар).

3. DIELECTRIC RESEARCH AND TESTS

It is known that all types of electrical equipment, in particular electrical and power electronic apparatus contain current-carrying parts operating at different electrical potentials. Therefore, insulation (insulation structures) is an integral element of any apparatus. It should be noted that insulation is the most responsible component of the apparatus, since its breakdown leads to grave malfunctions and even emergencies in electrical systems. That is why one of the most important tasks facing the developers of apparatus, as well as enterprises that carry out their manufacture, installation, testing and operation is to ensure reliable operation of the apparatus insulation.

According to function performed by insulation in electric apparatus, there are distinguished two its types, external and internal. *External insulation* refers to isolating structures, in which electric strength of insulating gaps is ensured by free air. *Internal insulation* refers to those that is separated from free air and electric strength of insulating gaps is ensured by various gaseous, liquid, solid dielectrics, as well as vacuum environment. A number of requirements are imposed upon both external and internal insulation of apparatus; their compliance are verified by means of testing. In particular, requirements for insulation of high-voltage apparatus and its testing techniques are established by interstate standards valid in Ukrainian territory [14, 15], as well as international IEC standards [28, 29, 33–35]. Requirements and testing techniques of low voltage apparatus insulation are established by national standards [16, 17], as well as international IEC standards [32, 36, 37].

3.1 Techniques of Dielectric Research and Tests

Dielectric tests are performed not only at all development stages of new equipment, but also at their industrial production and operation. The necessity to perform dielectric testing in the process of R&D-work are dictated by the following factors. Firstly, there are scientific interests aimed mainly to study the physics of electrical breakdown in gaseous, liquid, and solid dielectrics that now still has not been studied in full measure and is currently the subject of scientific research.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ ІЗОЛЯЦІЇ

Відомо, що усі види електротехнічного обладнання, зокрема електричні та електронні апарати, містять струмоведучі частини, що знаходяться під різними потенціалами. Отже невід'ємним елементом будь-якого апарату є ізоляція (ізоляційні конструкції). Слід зазначити, що ізоляція є найбільш відповідальним елементом апарата, оскільки порушення її функціонування веде до серйозних розладів і навіть до аварій в електричних системах. Отже забезпечення її надійної роботи є однією з важливіших задач, що стоїть перед розробниками апаратів, а також організаціями, що здійснюють їх виготовлення, монтаж, випробування та експлуатацію.

Функціонально в розрізняють *зовнішню ізоляцію*, яка забезпечується атмосферним повітрям, та *внутрішню ізоляцію*, яка вона відокремлена від атмосферного повітря і забезпечується різними газоподібними, рідинними, твердими діелектриками, а у деяких випадках – вакуумом. До ізоляції апаратів (як зовнішньої, і внутрішньої) пред'являється ряд вимог, які перевіряються в процесі досліджень та випробувань. Зокрема, вимоги до ізоляції апаратів високої напруги та методи її випробувань встановлюються міждержавними стандартами, що діють на території України [14, 15], а також міжнародними стандартами МЕК [28, 29, 33–35]. Вимоги та методи випробувань ізоляції низьковольтних апаратів встановлені національними стандартами [16, 17], а також міжнародними стандартами МЕК [32, 36, 37].

3.1 Методи дослідження та випробування ізоляції

Випробування ізоляції проводяться не тільки на всіх етапах розробки нових апаратів, а й у процесі їх промислового виготовлення та експлуатації. Необхідність проведення випробувань ізоляції в процесі НДР та ДКР обумовлені наступними факторами. По-перше, науковими інтересами бо фізика електричного пробою в газоподібних, рідких та твердих діелектриках вивчена не повною мірою і в даний час є предметом наукових досліджень.

Another factor that necessitates carrying out research and testing of electrical insulation is that the calculating determination of optimal insulation gaps for designed apparatus is a formidable task involved with necessity to determine the electric field pattern. This, in turn, necessitates solving differential equations in partial derivatives. It should be pointed out here that the calculations of the electric field do not take into account the diversity of environmental conditions that essentially affect the electric strength of the insulation gaps, such as humidity, contamination, rain, snow, hoarfrost etc. Thus, the experimental determination of the electrical strength of the insulation by conducting tests under the influence of external factors is almost the only objective way to determine the optimal values of the insulation gaps.

The necessity of dielectric tests during production of electrical and power electronic apparatus is mainly dictated by the probable technological errors having objective and subjective character, which lead to reduction of electric strength of the insulation, and in some cases to its disturbance. Therefore, each apparatus undergoes approval tests that include verification of the insulation quality. The insulation quality is in more detail verified in the process of periodic and type tests.

In the operation process, the apparatus' insulation, both external and internal, undergo various exposures and its condition essentially changes over time. First and foremost, it should be noted that the insulation of electrical and power electronic apparatus is permanently applied by the operating voltage and, correspondingly, the insulating gaps are stressed by the electric field. It results in appearance and building up of defects from ionization of air inclusions into solid insulation causing additional their heating. This, in turn, can cause overlap or breakdown of the insulation gap. These processes are considerably accelerated under overvoltage conditions.

In addition, during operation, the apparatus' insulation is exposed to thermal and mechanical stress, as well as moisture and pollution. Thermal effects cause acceleration of chemical processes in solid insulation, in particular, oxidation resulting in structural changes of the insulation and its mechanical and electrical strength significantly decrease. Mechanical exposures (shocks, vibration) produce micro-cracks, air inclusions, delamination in solid insulation, which also lead to a decrease in its electrical strength. Humidification and pollution cause partial discharges and, in some cases, overlaps of the insulation gap. Moisture and pollutions are especially dangerous for insulation having mechanical damages; penetration of moisture and pollutions into cracks create overlapping paths.

Іншим фактором, який обумовлює необхідність проведення досліджень та випробувань електричної ізоляції є те, що розрахункове визначення ізоляційних проміжків ускладнено, оскільки пов'язано з визначенням картини електричного поля і, відповідно, вирішенням диференціальних рівнянь у часткових похідних. Причому, розрахунки електричного поля не враховують вплив різноманіття зовнішніх факторів на електричну міцність ізоляційних проміжків (вологість, забруднення, дощ, сніг, іній та ін.). Отже, експериментальне визначення електричної міцності ізоляції шляхом проведення випробувань при наявності впливу зовнішніх факторів є практично єдино об'єктивним способом визначити оптимальні величини ізоляційних проміжків.

Під час промислового виготовлення апаратів необхідність випробувань ізоляції обумовлена, насамперед, вірогідністю технологічних порушень, помилок об'єктивного та суб'єктивного характеру, які ведуть до ослаблення ізоляції, зниження її електричної міцності. Тому кожний вироблений апарат піддається приймально-здавальним випробуванням, до програми якої входить перевірка електричної міцності ізоляції. Більш детальна перевірка якості ізоляції апаратів, що виробляються здійснюється в процесі періодичних та типових випробувань.

В процесі експлуатації апаратів як зовнішня, так і внутрішня ізоляція піддається різного роду впливам і її стан з часом поступово змінюється у бік погіршення. Перш за все, слід зазначити, що ізоляція електричних та електронних апаратів постійно піддається дії робочої напруги і, відповідно, ізоляційні проміжки піддаються дії електричного поля. Це приводить до виникнення та накопичення дефектів від іонізації повітряних включень твердої ізоляції, викликаючи додатковий нагрів, що, у свою чергу, може привести до перекриття або пробоя ізоляційного проміжку. При перенапругах цей процес значно прискорюється.

Крім того, в процесі експлуатації ізоляція піддається тепловому та механічному впливу, а також зволоженню та забрудненню. Внаслідок теплової дії в твердій ізоляції прискорюються хімічні процеси, зокрема, окислення, в результаті чого ізоляція змінює свою структуру, а її механічна та електрична міцність значно знижується. Внаслідок механічних впливів (удари, вібрація) у твердій ізоляції з'являються мікротріщини, повітряні включення, розшарування, які також призводять до зниження електричної міцності твердої ізоляції. Зволоження та забруднення є причиною часткових розрядів, а в деяких випадках, перекриття ізоляційного проміжку. Для ізоляції, яка має механічні пошкодження, волога та забруднення особливо небезпечні; проникнення вологи та забруднення в тріщини створює шляхи перекриття.

Denoted factors usually act jointly and result in ageing of insulation and over the time, its condition is deteriorated. Since there is impossible to avoid fully this, the one of main problems during operation of electrical and power electronic apparatus is to mitigate these exposures on insulation and their consequences. It should be noted that it is very complex problem. Until recent time, the main technique to control the insulation condition was visual inspection. However, service experience shows that only insignificant parts of defects can be detected in such manner. Now in operation, insulation of most responsible (mainly high-voltage) apparatus, is controlled by the way of conducting the so-called *service checking* or *preventive testing*. Despite considerable costs, service experience shows their significant economic efficiency. Suffice it to note that promotion of preventive testing into service practice has permitted reduce accident rate of the equipment by almost half.

The mere idea (principle) of checking the quality or condition of the insulation is very simple. A voltage of a certain value is applied to the insulation gap for some time and its certain parameter is measured, such as dielectric strength (presence of full discharge), resistance, dielectric loss tangent, presence of corona etc.

One of the most effective technique to verify the insulation quality is testing by overrated (withstand) voltage that considerably higher than the maximal operating voltage. In this case, the gap to be tested is stressed by a heightened intensity of the electric field that enables us to detect defects, which cannot be detected by other techniques. Testing by overrated voltage is basic test that must result in final decision about the possibility of normal operation of the apparatus in operating conditions.

The overrated (withstand) voltage applied to the insulation gaps in testing is usually termed as the *test voltage*. The main types of test voltages are as follows: *power frequency withstand voltage*, impulse (surge) withstand voltages (*lightning* and *switching impulses*), and *dc withstand voltage*. Testing by withstand voltage is performed after a preliminary inspection and verification of the insulation condition by other methods (resistance, loss tangent and other measurements) at positive outcomes of the verification. The magnitudes of test voltages are specified by interstate standard [15], international IEC standards [28], as well as by programs and test procedures, and Specs for certain types of the apparatus.

Зазначені причини погіршення стану ізоляції діють, як правило, су-місно, в результаті чого з часом відбувається старіння ізоляції і погіршення її стану. Тому однією з основних задач організацій, що здійснюють експлуатацію електричних апаратів, є обмеження вказаних дій на ізоляцію, оскільки повністю уникнути їх неможливо. Слід відзначити, що зазначена задача не така проста. До недавнього часу основним методом контролю стану ізоляції був зовнішній огляд, але таким чином можна виявити лише незначну частину дефектів. У нинішній час в процесі експлуатації ізоляція найбільш відповідальних апаратів, головним чином апаратів високої напруги, постійно контролюється шляхом проведення т.з. *профілактичних випробувань*. Незважаючи на значні витрати на їх проведення, досвід експлуатації показав їх значну економічну ефективність. Достатньо зазначити, що втілення профілактичних випробувань в практику експлуатації електричного обладнання дозволило знизити аварійність майже в 2 рази.

Сама ідея перевірки якості або стану ізоляції дуже проста. До ізоляційного проміжку на деякий час прикладається напруга означеної величини і вимірюється її певний параметр: електрична міцність (наявність повних розрядів), опір, тангенс кута діелектричних втрат, наявність корони і т.д.

Одним з найбільш ефективних способів перевірки якості ізоляції є її випробування підвищеною напругою, яка значно вище за максимальну робочу напругу. У цьому випадку у випробуваному проміжку утворюється підвищена напруженість електричного поля, що дозволяє виявити дефекти, які неможливо виявити іншими способами. Випробування підвищеною напругою – це основне випробування, після чого виноситься остаточне рішення щодо можливості нормальної роботи апарата в умовах експлуатації.

Підвищена напруга, що прикладається до ізоляційних проміжків в процесі випробувань, за звичаєм називають *випробною напругою*. Основними видами випробних напруг є *напруга промислової частоти*, імпульсні напруги (*грозовий та комутаційний імпульси*), а також *постійна напруга*. Випробування підвищеною напругою проводиться після попереднього огляду та перевірки стану ізоляції іншими методами (вимірювання опору, тангенса кута діелектричних втрат та іншими) при позитивних результатах цієї перевірки. Значення випробних напруг встановлюються міждержавним стандартом [15], міжнародними стандартами МЕК [28], а також технічними умовами, програмами та методиками випробувань певних видів апаратів.

3.2 Content of Tests and Test Equipment

During R&D-works, various research tests of insulation, as well as control and certification tests of mock-ups and prototypes of insulating structures and apparatus are performed with use of all types of test voltages in various environmental conditions, including conditions of pollution and dust, under rain, etc. In addition, research and tests are conducted for the purpose to determine other insulation characteristics (resistance, dielectric loss tangent, presence of corona, etc.).

Dielectric tests at R&D stage are usually performed in the specially equipped *high-voltage laboratories* representing very complicated technical complexes. A high-voltage (HV) laboratory usually contains main equipment (high voltage sources, as well as measuring and protection devices) and auxiliary equipment intended to provide specific conditions for research and testing.

The main types of high-voltage sources (*HV generators*) in HV laboratories are as follows:

- *HV impulse generators* providing testing of apparatus with impulse voltage, lightning impulse and switching impulse;
- *AC sine voltage sources* providing testing of apparatus with power frequency voltage and induced voltage (of heightened frequency in the range of 100 to 400 Hz);
- *DC (rectified) voltage sources*.

Auxiliary equipment of HV laboratory usually includes:

- *shielding facilities*: the object to be tested and measuring facilities are carefully screened to preclude noises in measuring (this is especially important for partial discharge measurements);
- *climatic chambers* intended to provide a predetermined ambient temperature and humidity;
- *pollution and dusting chambers*;
- *dim-out facilities* intended to observe the discharge initial stages, as well as to perform photographic investigations of breakdown;
- *artificial rain equipment* intended to determine wet-flash voltages and to perform testing under rain.

The rain equipment must ensure certain parameters for rain during research and testing:

3.2 Зміст випробувань та випробне обладнання

В процесі НДР та ДКР проводять різноманітні дослідницькі випробування ізоляції, а також контрольні та сертифікаційні випробування макетів та дослідних зразків ізоляційних конструкцій та апаратів усіма видами випробних напруг у різних умовах довкілля, у тому числі умовах забруднення та запилення, під дощем та ін. Окрім цього, проводять дослідження та випробування з визначенням інших характеристик ізоляції (опір, тангенс кута діелектричних втрат, наявність корони і т.д.).

Випробування ізоляції на етапах НДР та ДКР проводяться в спеціально обладнаних *високовольтних лабораторіях (високовольтних залах)*, які являють собою досить складні технічні комплекси. Високовольтний зал зазвичай містить основне обладнання (джерела високої напруги, а також вимірювальні та захисні пристрої) та допоміжне обладнання, яке забезпечує створення для досліджень та випробувань заданих умов.

Основними різновидами джерел високої напруги у високовольтних залах є:

- *генератори імпульсних напруг (ГІН)*, які забезпечують випробування апаратів імпульсною напругою: грозовими та комутаційними імпульсами;
- *джерела синусоїдальної напруги*, які забезпечують випробування напругою промислової частоти та індукованою напругою (підвищеної частоти від 100 до 400 Гц);
- *джерела постійної (випрямленої) напруги*.

Допоміжне обладнання високовольтного залу зазвичай містить:

- *екранувальні пристрої*: випробуваний об'єкт та вимірювальні пристрої ретельно екрануються для виключення перешкод при вимірах (особливо це важливо при вимірі рівня часткових розрядів);
- *кліматичні камери* для створення заданої температури і вологості навколишнього середовища;
- камери для досліджень та випробувань в умовах *забруднення та запилення*;
- пристрої, що створюють можливість *затемнення* для спостереження початкових стадій розряду, проведення фотографічних досліджень пробою;
- *дощувальні установки* для створення штучного дощу при визначенні мокророзрядних напруг і випробувань під дощем.

Дощувальна установка в процесі випробувань повинна забезпечувати визначені параметри дощу:

- the rain area should completely cover the test object;
- a uniform rain of a droplet structure falling at 45° to the horizontal;
- the rain intensity (one of the components) should be in the range of 1 to 3 mm per minute according on the test voltage type;
- the rain water temperature should not differ from the ambient temperature by more than 10 K;
- the resistivity of rain water, reduced to +20°C, should be 100±15 Ohm m.

Worldwide, there are more than one hundred high-voltage laboratories having testing equipment providing test voltage higher than one million volts. One of largest in the world is the Large HV Laboratory in PJSC “VIT” (Ukrainian Research, Design and Technology Transformer Institute) placed in Zaporizhzhia. Its dimensions constitute 55×57 ×144 m. The set equipment enables to perform tests with all test voltage types: power frequency voltage as high as 2.25 MV (at a current about 2 A); lightning impulse as high as 4.8 MV (at W = 320 kJ); dc voltage as high as 2.5 MV (at a current of 200 mA) in different climatic conditions. The parameters of other most large laboratories are represented in Table 3.1.

Table 3.1 – Parameters of the most powerful HV Laboratories

Organization, name	Location	Impulse voltage, MV	AC voltage, MV	DC voltage, MV
Central Power Research Institute (CPRI)	Hyderabad, India	4,4	1.6	1.2
Hydro-Quebec Research Institute (IREQ)	Canada	5.4	1.8	1.2
Electricity de France (EDF)	Renardieres, France	3	1.1	0.6
All Russian Electro-technical Institute (БЭИ)	Moscow, Russia	9	3	2.25
KEMA – CESI, HV Laboratory	Arnhem, Netherlands	2.6	1,2	1

- зона дії дощу повинна цілком охоплювати випробуваний об'єкт;
- на випробуваний об'єкт повинен падати рівномірний дощ краплинної структури під кутом 45° до горизонталі;
- сила дощу (одна зі складових) повинна складати 1–3 мм/хв в залежності від виду випробної напруги;
- температура води не повинна відрізнятись від температури навколишнього середовища не більш ніж на 10°C.
- питомий опір води, приведений до +20°C повинен складати 100±15 Ом·м;

В усьому світі нараховується більш 100 залів з випробним устаткуванням, що дозволяє забезпечити напругу вище 1 МВ. Одним із найбільших є високовольтна лабораторія Українського інституту трансформаторобудування (ВІТ, м. Запоріжжя). Її габарити складають 55×57×144 м, джерела напруги забезпечують: синусоїдальну напругу промислової частоти 2,25 МВ (при струмі порядку 2 А); імпульсну напругу 4,8 МВ (при W = 320 кДж); постійну напругу 2,5 МВ (при струмі 200 мА). Параметри найпотужніших високовольтних лабораторій у світі надані у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри світових високовольтних лабораторій

Найменування інституції	Місце розташування	Імпульсна напруга, МВ	Напруга промислової частоти, МВ	Постійна напруга, МВ
Центральний науково-дослідний інститут енергетики (CPRI)	Хайдерабад, Індія	5	1.1	0.3
Науково-дослідний інститут Гідро-Квебек (IREQ)	Канада	5.4	1.8	1.2
Електрика Франції (EDF)	Ренард'є, Франція	6	1.1	0.6
Всеросійський електротехнічний інститут (ВЭИ)	Москва, Росія	9	3	2.25
КЕМА – CESI	Анхем, Нідерланди	2.6	1	1

Acceptance dielectric tests in manufacturing electric and power electronic apparatus are usually performed immediately at the factory in specially equipped *test bays* fenced by metal grid. Acceptance dielectric tests are usually performed with a power frequency voltage only. Periodic and type dielectric tests are usually performed in HV laboratories; in this case, the insulation is tested with both power frequency and impulse voltages. These tests are performed both in dry conditions and under rain. Temperature in the test building must be in the range of +10...+40°C, humidity factor about 80%.

Service (preventive) dielectric tests are performed directly on the site where the apparatus is operated, either outdoor (in the case outdoor operation) or indoor (in the case indoor operation). The outdoor testing are performed at the absence of precipitation, as well as dew on the surface of solid insulation. The test voltage magnitudes are usually set about 75 % of those used for production tests. They are usually specified for normal atmospheric conditions, namely, ambient temperature is +20°C, atmospheric pressure is 101300 Pa (760 mm of mercury), and humidity is 11 g /m³. If the external insulation is tested under ambient conditions that differ from normal ones, then the correction coefficients should be applied [14].

3.3 Impulse Withstand Voltage Tests

Impulse (surge) voltage is mainly used to test the apparatus for high voltage applications. As already noted, there are two types of impulse voltages, lightning impulse and switching impulse.

Lightning impulse withstand voltage or *basic impulse level (BIL)* (full wave) takes waveform as shown in Figure 3.1

There following basic parameters of full lightning impulse are:

- *test voltage value* that corresponds to the peak voltage (tolerance for test voltage magnitude is $\pm 3\%$);
- *front time* that is a time interval between the virtual origin (point O₁) and the time moment corresponding the intersection point of curve linear portion continuation (segment AB) with the axis corresponding to the test voltage value (point O₂); the front time can be also evaluated by the following expression:

Приймально-здавальні випробування ізоляції в процесі виробництва електричних та електронних апаратів проводять безпосередньо на підприємствах у спеціалізованих випробувальних цехах на спеціально обладнаних *випробних полях*, огорожених металевою сіткою. У процесі приймально-здавальних випробувань, як правило, обмежуються випробуванням ізоляції напругою промислової частоти. Періодичні і типові випробування, як правило, проводяться у високовольтних залах; у цьому випадку ізоляція піддається перевірці як напругою промислової частоти, так і імпульсною напругою, у сухому стані і під дощем. Температура навколишнього середовища в помешканні, де проводяться випробування ізоляції, повинна бути в межах від +10 до +40°C, відносна вологість порядку 80%.

Профілактичні випробування ізоляції проводяться безпосередньо на місці експлуатації апарата: у приміщенні або на відкритих площадках, в залежності від категорії розміщення апарата. Випробування на відкритих площадках проводяться за відсутності опадів, а також роси на поверхні твердої ізоляції. Величини випробних напруг, що надаються у нормативно-технічній документації, за звичаєм складають приблизно 75% від тих, якими вони випробовуються при виготовленні і відповідають нормальним атмосферним умовам: температура навколишнього повітря +20°C, атмосферний тиск – 101300 Па (760 мм рт. ст.), абсолютна вологість 11 г/м³. Якщо при проведенні випробувань зовнішньої ізоляції, атмосферні умови відрізняються від нормальних, то величини випробних напруг коригуються відповідними поправочними коефіцієнтами [14].

3.3 Випробування імпульсною напругою

Імпульсна напруга використовується переважно для випробування високовольтних апаратів. Як зазначено вище, існує два різновиди імпульсної напруги: грозовий імпульс і комутаційний імпульс.

Повний грозовий імпульс являє собою випробну напругу, форма якої показана на рис. 3.1.

Основними параметрами повного грозового імпульсу є:

- *випробна напруга*, величина якої відповідає максимальному значенню напруги (точка F, рис. 3.1); допуск на величину випробної напруги складає $\pm 3\%$;

- *тривалість фронту* T_{ϕ} являє собою проміжок часу між умовним початком імпульсу (точка O_1) і моментом часу, що відповідає точці перетинання продовження лінійної ділянки імпульсу (відрізок АВ, рис. 3.1) з віссю, що відповідає випробній напрузі (точка O_2 , рис. 3.1); тривалість фронту може бути також визначена за наступним виразом:

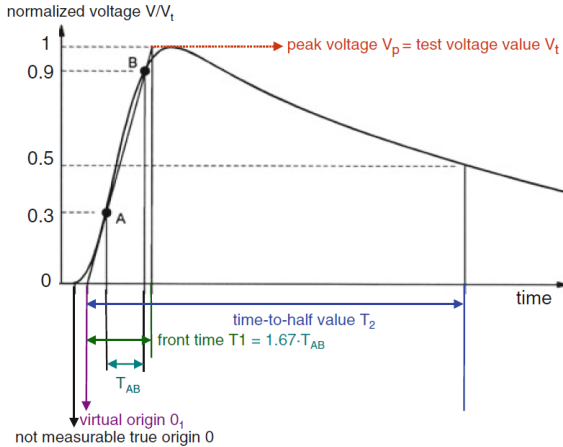


Figure 3.1 – Basic impulse level (full wave): waveform and parameters

$$T_1 = 1,67 \cdot T_{AB};$$

- *time to half* or *tail time* that is defined as the time interval between the virtual origin O_1 and the moment corresponding to half of the test voltage on the wave tail.

The standard full lightning impulse has the following parameters:

$T_\phi = 1,2 \pm 0,36 \mu\text{s}$; $T_{ii} = 50 \pm 10 \mu\text{s}$; impulse designation is 1.2/50.

Besides the full wave, the so-called *chopped waves* are applied for testing windings of apparatus for high voltage applications (so-called *chopped-wave test*). There are *front-chopped wave*, shown in Figure 3.2a, and *tail-chopped wave*, shown in Figure 3.2b, depending on the chopping moment.

The chopped-wave voltage is specified with front time (as well as full wave), and also with *time to chop* T_c that is defined by the interval between the virtual origin and the chopping moment (point C). Time to chop of a standard chopped impulse is usually in the range of 2 to 5 μs .

As already noted, lightning impulse voltages are usually generated by *high voltage (HV) impulse or surge generators*. Its main component is a capacitor system, which is charged during relatively long time, when the capacitors (capacitor groups) are parallel connected, and then is discharged during very short time, when the capacitors (capacitor groups) are in series. The capacitor system of HV surge generator represents usually a certain number of paper-bakelite or paper-oil capacitors with metal or porcelain enclosure.

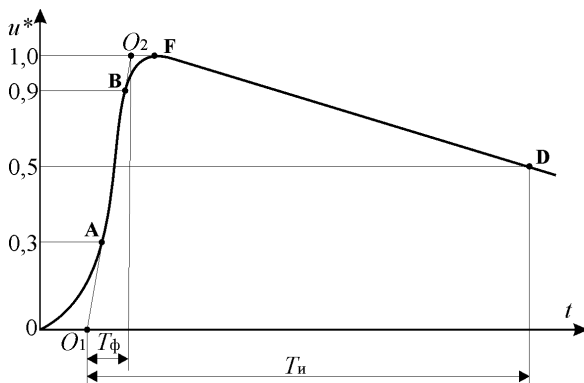


Рисунок 3.1 – Повний грозвий імпульс

$$T_\phi = 1,67 \cdot T_{AB};$$

- *тривалість імпульсу* $T_\text{и}$ визначається як інтервал часу між умовним початком імпульсу O_1 і моментом на спаді, що відповідає половині випробної напруги.

Стандартний повний грозвої імпульс має такі параметри:

$T_\phi = 1,2 \pm 0,36$ мкс; $T_\text{и} = 50 \pm 10$ мкс; позначення імпульсу – 1,2/50.

Поряд з повним грозвим імпульсом, при випробуваннях обмоток апаратів високої напруги застосовуються зрізані грозві імпульси. В залежності від моменту зрізу розрізняють грозві імпульси, зрізані на фронті, рис. 3.2а, та зрізані на спаді, рис. 3.2б.

Зрізані імпульси характеризуються тривалістю фронту (аналогічно повному імпульсу), а також *передрозрядним часом*, тобто відрізком часу між умовним початком імпульсу і моментом його зрізу (точка С). Передрозрядний час стандартного зрізаного імпульсу складає за звичаєм 2–5 мкс.

Як вже зазначалось, джерелом високої напруги при випробуваннях імпульсною напругою є т.з. *генератор імпульсної напруги* (ГІН). Його основним елементом є система конденсаторів, що заряджаються протягом відносно тривалого часу при паралельному їх з'єднанні, а потім розряджаються при їх послідовному з'єднанні за дуже короткий проміжок часу. Найбільш широко в ГІН використовуються паперово-бакелітові конденсатори та паперово-олійні з металевим та фарфоровим корпусом.

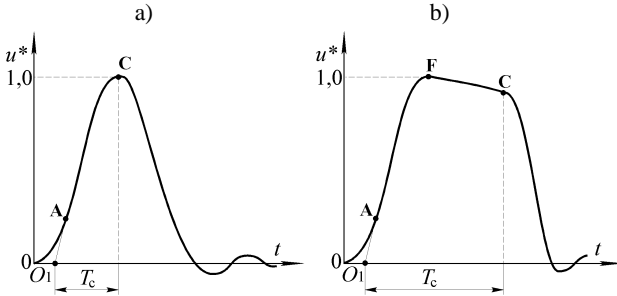


Figure 3.2 – Basic impulse level (chopped waves):
 a) front-chopped wave; b) tail-chopped wave

The most common are generators constructed according to the Arkadiev-Marx circuit usually called *Marx generator*. There are two circuit variations, *single-step circuit* and *multi-step circuit*. Single-step circuit contains one capacitor (or one capacitor group); multi-step one contains several capacitors (several capacitor groups). Single-step circuit of HV impulse generator is represented in Figure 3.3.

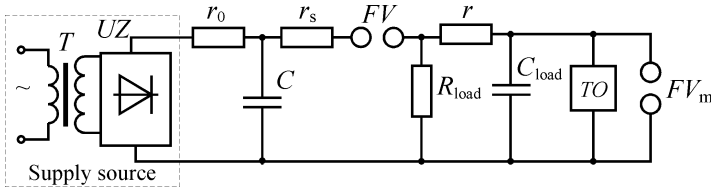


Figure 3.3 – Circuit diagram of one-step HV impulse generator.

The circuit contains charging and discharge subcircuits. Charging subcircuit, besides the capacitor system C , contains *charging resistor* r_0 , intended to limit charging current, and a supply source including a step-up transformer T and a rectifier UZ . The discharge subcircuit, besides a test object TO , contain the following components:

- *spark arrester* FV , which carries out changing over the capacitor system from charging to discharging operation; the arrester is disrupted as stressed voltage attains breakdown value or starting impulse is applied;
- *front* r and *load* R_{load} *resistors* that define front and tail time, respectively.
- *load capacitor* C_{load} intended to reduce the influence of test object capacitance to the impulse waveform;

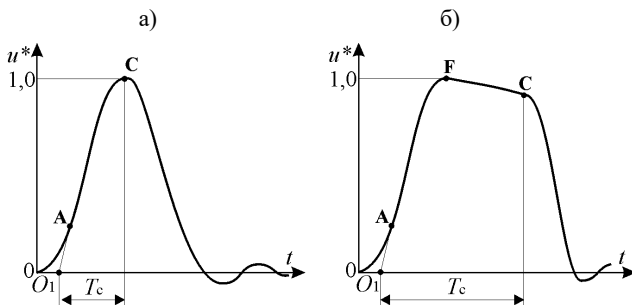


Рисунок 3.2 – Зрізані грозові імпульси: а) на фронті; б) на спаді

Найбільш поширеними є генератори, виконані за схемою Аркадьєва-Маркса. Існує два різновиди схем: одноступінчасті та багатоступінчасті. У одноступінчастих ГІН використовується один конденсатор (або одна група конденсаторів), багатоступінчастих – кілька (кілька груп) конденсаторів. Схема одноступінчастого ГІН надана на рис. 3.3.

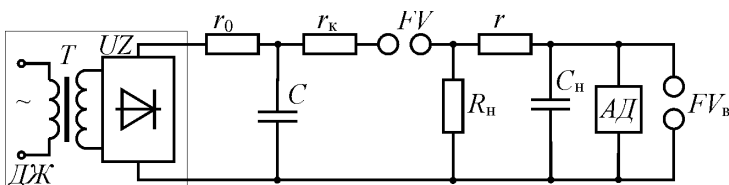


Рисунок 3.3 – Схема одноступінчастого ГІН

Схема містить зарядний і розрядний контури. Зарядний контур, окрім системи конденсаторів C , містить *зарядний резистор* r_0 , призначений для обмеження зарядного струму, і джерело живлення $ДЖ$, яке в свою чергу містить підвищувальний трансформатор T і випрямляч UZ . Розрядний контур окрім випробуваного апарата AD , містить:

а) *іскровий розрядник* FV , який здійснює переключення системи конденсаторів з режиму заряду на режим розряду; пробій FV відбувається при досягненні на ньому пробивної напруги або при подачі пускового імпульсу;

б) *фронтний* r та *навантажувальний* R_n *резистори*, опір яких визначає тривалість фронту та тривалість імпульсу, відповідно;

в) *навантажувальна ємність* C_n , яка призначена для зменшення впливу ємності випробуваного апарата на форму імпульсу;

- *smoothing or damping resistor* r_s provides mitigation of HF oscillations on the impulse front caused by the presence of stray elements in discharge subcircuit, such as inductance of discharge loop, capacitance of the generator constructive components to ground and between each other;

- *measuring sphere gap* FV_m performs two functions: the first is to adjust the generator according to the specified test voltage magnitude; the second is to protect the test object against a casual application of over-test voltage; before testing, the gap is installed so that flashover voltage would be about 10...20% more than the test voltage.

The circuit of multi-step HV impulse generator is represented in Figure 3.4.

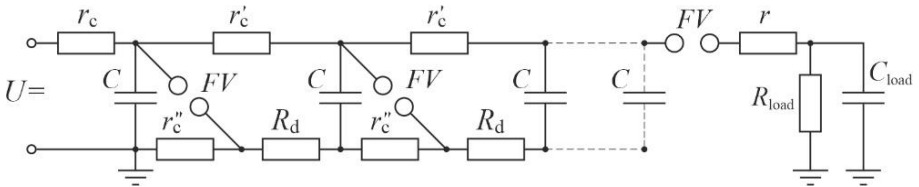


Figure 3.4 – Circuit diagram of multi-step HV impulse generator.

In this case, the generator consists of several steps. Each step, in addition to the capacitor (group of capacitors) C , contains resistors, as well as a spark arrester FV . Capacitances of the steps C are charged in parallel via charging resistor r_c , and charging and damping resistors of the steps r'_c i $r''_c + R_d$. The value of r_c is chosen greater than nr'_c (where n is the number of steps), so the voltage across all capacitors C , when they are charged, is practically the same.

At a predetermined time instant, a firing impulse is applied to the first-step arrester FV , which strikes. It results in the potential difference across the electrodes of the second-step arrester rapidly rise up to double value of charge voltage and it sparks. In the same manner, other steps arresters spark. After this, the capacitances of all steps become series connected via the small resistances of the damping resistors R_d , which, in combination with resistor r , perform function of the front resistor. The necessary pulse decay is ensured by the selection of the magnitudes r'_c and r''_c .

As an example, a photograph of a 2.2 MV 12-step HV impulse generator is shown in Figure 3.5 [20].

г) згладжувальний резистор r_k , який здійснює згладжування високо-частотних коливань на фронті імпульсу, які обумовлені наявністю в розрядному контурі паразитних елементів: індуктивності розрядної петлі, ємності конструктивних елементів схеми на землю і між собою;

д) вимірювальний розрядник FV_v виконує дві функції: перша – налаштування генератора відповідно до необхідних параметрів імпульсу; друга – захист випробуваного апарата від випадкової подачі напруги, яка набагато перевищує випробну; перед випробуваннями розрядник налаштовується таким чином, щоб його розрядна напруга була на 10–20% вище за випробну напругу.

Схема багатоступінчастого ГІН надана на рис. 3.4.

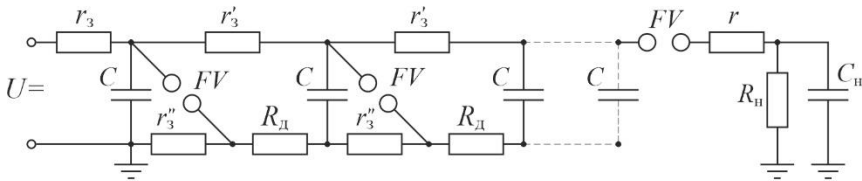


Рисунок 3.4 – Схема багатоступінчастого ГІН

У даному випадку генератор складається з декількох ступенів, кожна з яких, окрім конденсатору (групи конденсаторів) C , містить резистори, а також іскровий розрядник FV . Ємності ступенів C паралельно заряджаються через зарядний резистор r_3 , а також зарядні та демпфувальні резистори ступенів r'_3 і $r''_3 + R_d$. Значення r_3 вибирається більше, ніж nr'_3 (де n – число ступенів), тому при зарядці напруга на всіх ємностях C практично однакова.

У заданий момент подається підпалювальний імпульс на керувальний розрядник FV першого ступеню, який пробивається, в результаті чого різниця потенціалів між електродами розрядника другого ступеню швидко зростає до подвійного значення зарядної напруги, і він пробивається. Аналогічно забезпечується спрацьовування інших розрядників, поле чого ємності всіх ступенів виявляються з'єднаними послідовно через невеликі опори демпфувальних резисторів R_d , які у сполученні з резистором r виконують функцію фронтового резистора. Необхідний спад імпульсу забезпечується підбором величин r'_3 і r''_3 .

Як приклад, на рисунку 3.5 надана фотографія 12-ступінчастого ГІН на 2,2 МВ [20].

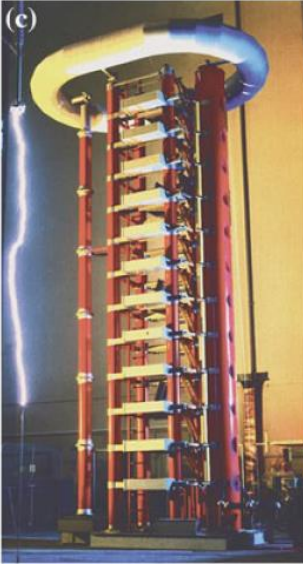


Figure 3.5 – Photograph of a 2.2-MV HV impulse generator

Switching impulse is the test voltage, which may have aperiodic waveform shown in Figure 3.6a, or oscillatory shown in Figure 3.6b.

Switching impulses are specified with *time-to-peak* T_p and *time-to-half* T_h . The voltage crest (point A, Figure 3.5) defines the test voltage magnitude. A standard aperiodic impulse offers the following parameters: $T_p = 250 \mu\text{s}$; $T_h = 2500 \mu\text{s}$ (250/2500). It is applied for testing the internal and external insulation of almost all types of HV apparatus with voltage ratings 330 and 500 kV. To test gas-insulated HV apparatus, the oscillatory impulse 4000/7500 is used.

To generate switching impulses, the same equipment as that for generation of lightning impulses are frequently used (i.e.

HV impulse generators). Generators, readjusted to generate switching impulses, are usually called *generators of system (switching) overvoltages*. Its principal drawbacks are a low utilization factor and a large extent of readjustment when changing the impulse parameters or its type. Therefore, the more frequent application is to generate switching impulses with a test transformer powered from a capacitor bank via an inductance [20].

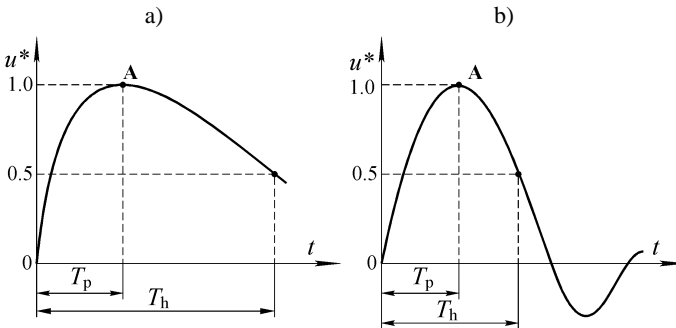


Figure 3.6 – Switching impulses: a) aperiodic; b) oscillatory.

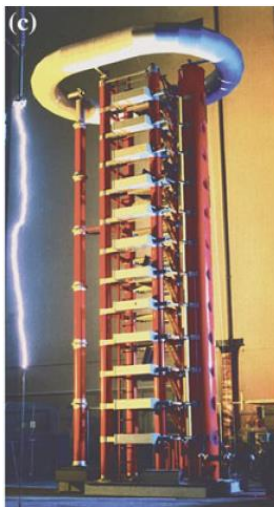


Рисунок 3.5 – Фотографія ГН на 2.2 МВ

Комутаційний імпульс являє собою випробну напругу, форма якої може аперіодичною, рис. 3.6а, або коливальною, рис. 3.6б.

Основними параметрами комутаційних імпульсів є: час підйому T_n і тривалість імпульсу T_i . Величина випробної напруги комутаційного імпульсу відповідає максимальному його значенню (точка А, рис. 3.6). Стандартний аперіодичний імпульс має такі параметри: $T_n = 250$ мкс; $T_i = 2500$ мкс (250/2500). Він використовується для випробувань внутрішньої і зовнішньої ізоляції практично усіх видів апаратів високої напруги 330 і 500 кВ. Для випробувань газової ізоляції апаратів використовується коливальний імпульс 4000/7500.

Для утворення комутаційних імпульсів часто використовують те ж саме устаткування, що і для утворення грозових імпульсів (тобто ГН). ГН, налаштовані для одержання комутаційних імпульсів прийнято називати *генераторами внутрішніх або комутаційних перенапруг*. Основним їх недоліком є низький коефіцієнт використання і великий об'єм переналаштування при зміні параметрів імпульсу або його виду. Тому для утворення комутаційних імпульсів частіше застосовують випробні трансформатори з живленням від конденсаторної батареї через індуктивність [20].

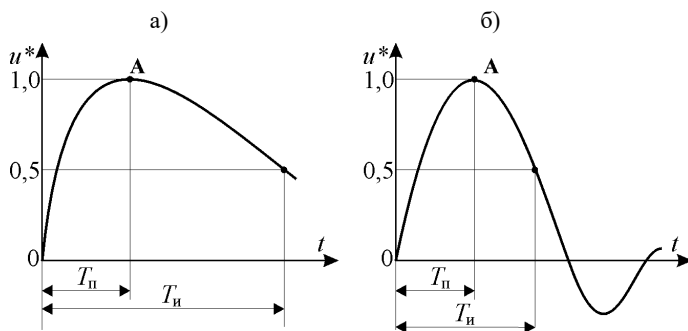


Рисунок 3.6 – Параметри комутаційних імпульсів: а) аперіодичного; б) коливального

Testing procedure. Before the impulse is applied to the test object, the generator is calibrated with a peak voltmeter or sphere gap. Internal insulation of HV apparatus (except gas-insulated ones) is tested by applying of three consecutive impulses of the specified test voltage with one-minute interval between them. Test according to this procedure is performed for each impulse type, i.e. full and chopped lightning impulses, and, if it is required, switching impulse. This series of the impulses are applied for each voltage polarity (positive and negative). The test outcome is positive, if there were not full discharges or other failures that are detected on distortion of the impulse waveform.

External insulation of HV apparatus, as well as internal insulation of gas-insulated apparatus are tested by applying to the test object of 15 consecutive impulses of the specified test voltage of each impulse type and each voltage polarity. External insulation is tested both in a dry state and under rain. In this case (for self-restoring insulation) the test outcome is considered as positive, if no more than two full discharge happened in each impulse series.

Internal and external insulation of the most HV apparatus, such as measuring transformers, reactors, switching devices, switchgear panels etc., are tested simultaneously by applying of 15 consecutive impulses.

3.4 Applied Withstand Voltage Tests

There are three main varieties of applied withstand voltage tests, namely, *power frequency withstand voltage test*, *induced withstand voltage test*, and *DC (rectified) withstand voltage test*.

Testing by power frequency withstand voltage. Power frequency test voltage is the sine waveform voltage of 50 or 60 Hz frequency. The magnitude of the test voltage corresponds to its rms value. The tolerance for the test voltage magnitude is ± 1 %. The power frequency voltage is used for testing the insulation of all types of electrical and power electronic apparatus, as well as household electrical devices. The circuit diagram of test installation is depicted in Figure 3.7

It should be noted that this circuit is used for not only testing by power frequency voltage, but also induced voltage, as well as measuring the no-load and short circuit losses of power transformers at power frequency. The circuit includes:

Методика випробувань. Перед подачею до досліджуваного об'єкта імпульсної напруги проводиться градування ГІН за допомогою пікового вольтметра або кульового розрядника. При випробуваннях внутрішньої ізоляції апаратів високої напруги, крім газонаповнених, використовується 3-ударний метод, що полягає у послідовній (з інтервалом у 1 хвилину) подачі трьох імпульсів нормованої випробної напруги. Випробування відповідно до зазначеного методу проводиться для кожного виду імпульсу повного і зрізаного і для кожної полярності – позитивної і негативної. Результати випробувань вважаються позитивними, якщо в їх процесі не спостерігалось жодного повного розряду, або інших ушкоджень, про наявність яких судять по спотворенню форми прикладеного імпульсу.

Випробування зовнішньої ізоляції апаратів, а також внутрішньої ізоляції газонаповнених апаратів проводиться 15-ударним методом для кожного виду імпульсу (повного і зрізаного) і для кожної полярності. Випробування зовнішньої ізоляції проводять як у сухому стані, так і під дощем. У цьому випадку, (для ізоляції, що самовідновлюється) результати випробувань вважаються позитивними, якщо відбулося не більш двох повних розрядів з кожної серії імпульсів.

Випробування внутрішньої і зовнішньої ізоляції більшості видів апаратів високої напруги (вимірювальні трансформатори, струмообмежувальні реактори, комутаційні апарати, комплектні пристрої та ін.) проводять одночасно, використовуючи при цьому 15-ударний метод.

3.4 Випробування прикладеною напругою

Існує три основні різновиди випробувань прикладеною напругою: *напругою промислової частоти, т.з. індукованою напругою та постійною (випрявленою) напругою.*

Випробування напругою промислової частоти. Випробна напруга промислової частоти являє собою напругу синусоїдальної форми частотою 50 або 60 Гц. Величина випробної напруги відповідає його діючому значенню. Допуск на величину випробної напруги складає $\pm 1\%$. Напруга промислової частоти використовується для випробувань ізоляції усіх видів електричних та електронних апаратів, а також електропобутової техніки. Структурна схема випробної установки надана на рис. 3.7.

Слід відзначити, що ця схема використовується не тільки для випробувань напругою промислової частоти, але й індукованою напругою, а також вимірювання втрат холостого ходу і короткого замикання силових трансформаторів при промисловій частоті. Схема містить:

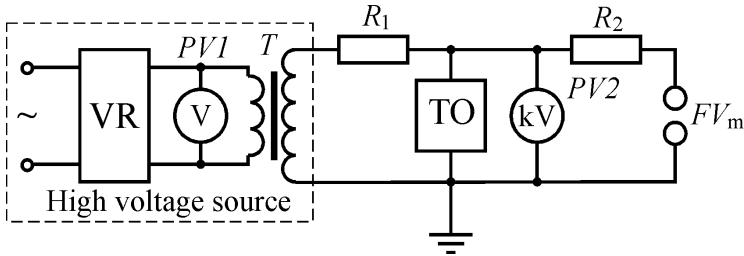


Figure 3.7 – Circuit diagram of dielectric testing by AC withstand voltage

- high voltage source that, in turn, includes *voltage regulator VR* that ensures smooth regulation of the amplitude, frequency and phase of the test voltage and stepping-up *test transformer T*, which ensures required test voltage level;
- measuring devices for measuring primary *PV1* and secondary (high) *PV2* voltages;
- measuring sphere gap *FV_m*; its functions are the same as in testing by impulse voltage (see subsection 3.3); to preclude burning away the sphere surfaces, a non-inductive current-limiting resistor *R₂*, enclosed by porcelain or glass water-filled casing, is connected in series with the sphere gap; its resistance usually ranges from 2 to 20 k Ω ;
- limiting resistor *R₁* serves to limit the current in the event of puncture or flashover of the insulation gap being tested to a safe value for the test transformer.

Voltage regulator is most frequently an autotransformer. However, when tests are performed with induced voltage, in addition to adjusting the amplitude of the test voltage, it is necessary to adjust its frequency. In this case, *rotating (MG system)* or *semiconductor frequency converters* are used.

The key component of the HV source is the *test transformer*. In the case, when the test voltage below 100 kV, the most applications of test transformer are low-capacity power transformers or voltage transformers. Many foreign corporations manufacture special purpose test transformers of various in design and parameters (oil-type and dry-type, insulation-clad and metal-clad, with solid, paper-oil, gas insulation etc.). As an example, photographs of test transformers are shown in Figure 3.8 [20].

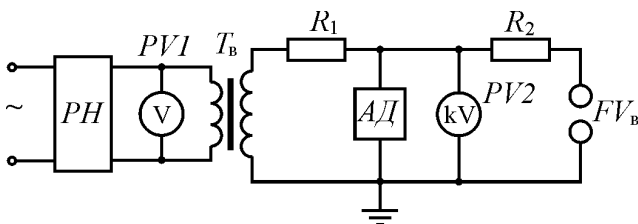


Рисунок 3.7 – Електрична схема випробувань ізоляції напругою промислової частоти

- джерело високої напруги, яке у свою чергу містить *регулятор напруги PH*, який забезпечує плавне регулювання амплітуди, частоти і фази випробувальної напруги, а також підвищувальний *випробувальний трансформатор T*, який забезпечує необхідний рівень випробувальної напруги;

- вимірювальні пристрої для вимірювання первинної та високої напруги *PV1, PV2*;

- *вимірювальний розрядник FV_m*; його функції такі ж, як при випробуваннях імпульсною напругою (див. підрозділ 3.3); для запобігання згоряння поверхні куль розрядника при пробоях, послідовно з ними включається безіндуктивний струмообмежувальний резистор *R₂* з фарфоровим або скляним корпусом, заповненим водою; його опір за звичаєм складає від 2 до 20 кОм;

- *обмежувальний резистор R₁* слугує для обмеження струму при пробіі (перекритті) ізоляційного проміжку до безпечного значення для випробного трансформатора.

Регулятор напруги частіше усього являє собою автотрансформатор. Але, при випробуваннях індукованою напругою, коли окрім регулювання амплітуди випробної напруги, потрібно регулювання її частоти, застосовуються електромашинні (система двигун-генератор) або напівпровідникові перетворювачі частоти.

Основним елементом джерела високої напруги в схемі є випробувальний трансформатор, в якості якого при відносно невисоких випробних напругах (до 10^5 В) використовуються малопотужні силові трансформатори або трансформатори напруги. Багатьма закордонними фірмами випускаються спеціальні випробувальні трансформатори, різноманітні по своїх конструкціях та параметрам: масляні і сухі, в ізоляційному або металевому кожусі, з твердою паперово-масляною або газовою ізоляцією і т.д. Як приклад, на рис. 3.8 надані фотографії випробувальних трансформаторів [20].

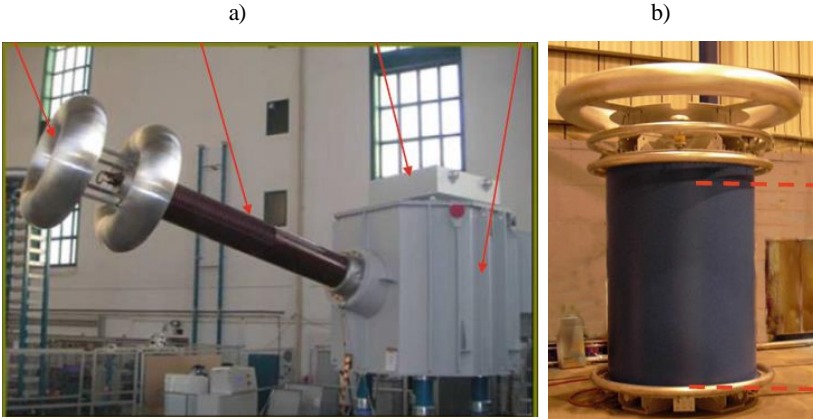


Figure 3.8 – Test transformers: a) metal-tank 600 kV, 2000 kVA;
b) cylinder-type 500 kV, 500 kVA

Capacity of the test transformer is dependent upon discharging power of the test object, which is determined by its capacitance and test voltage value:

$$S = 10^{-9} \omega C U^2, \text{ kVA},$$

where C is the capacitance of the insulation gap being tested, pF; U , ω is the value of the test voltage (in kV) and angular frequency (1/s), respectively.

The main requirement imposed upon test transformers is the absence of the partial discharges under the test voltage. At voltages below 10^5 kV it is not heavy problem. However, at higher voltages the test transformer design becomes more complicated because of technological difficulties to construct HV bushing. Therefore, from economic reasons, the test voltages of higher values are generated by not single test transformer, but several cascaded test transformers.

Figure 3.9a shows the circuit of three cascaded transformers. Figure 3.9a shows the photograph of the world's largest 3 MW/4.2 A transformer cascade with capacitor banks for generation of switching impulses [20].

To increase test voltage magnitude and while to decrease significantly the cost of equipment testing by applied voltage, the so-called *resonant circuits* can be also used. In addition to the test transformer, the resonant circuit usually contains HV reactor L , which can be connected in series (*series resonant circuit*), Figure 3.10a, or parallel (*parallel resonant circuit*), Figure 3.10b.

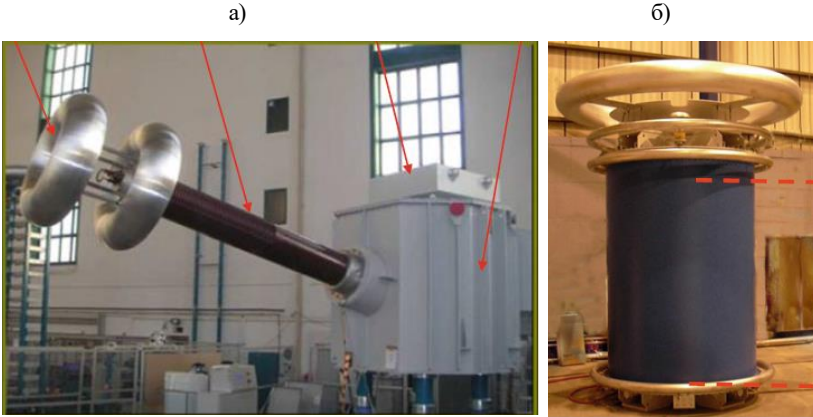


Рисунок 3.8 – Випробувальні трансформатори:
 а) баківий 600 кВ, 2000 кВА; б) циліндричний 500 кВ, 500 кВА

Потужність випробувального трансформатора залежить від розрядної потужності випробуваних апаратів, яка визначається їх ємністю та величиною випробної напруги

$$S = 10^{-9} \omega C U^2, \text{ кВА},$$

де C – ємність випробовуваного ізоляційного проміжку, пФ; U , ω – величина (кВ) та кутова частота (1/с) випробної напруги, відповідно.

Основною вимогою до випробних трансформаторів є відсутність власних часткових розрядів при випробній напрузі. При напругах до 10^5 В цього досягти досить просто. Але при більш високих напругах конструкція випробних трансформаторів ускладнюється, що обумовлено труднощами створення високовольтного вводу, тому з економічних розумінь краще здобувати високі випробні напруги не від окремого трансформатора, а від декількох трансформаторів, з'єднаних послідовно в каскад.

Схема каскадного з'єднання трьох трансформаторів надана на рис. 3.9а. На рис. 3.9б показана фотографія найкрупнішого у світі каскаду трансформаторів на 3 МВ/4,2 А з конденсаторними батареями для отримання комутаційних імпульсів [20].

Підвищення величини випробувальної напруги та одночасно суттєвого зниження вартості обладнання для випробувань прикладною напругою досягається також використанням т.з. *резонансних схем*. Резонансна схема, крім випробувального трансформатора, містить реактор L , який може бути включений послідовно, рис. 3.10а, або паралельно, рис. 3.10б.

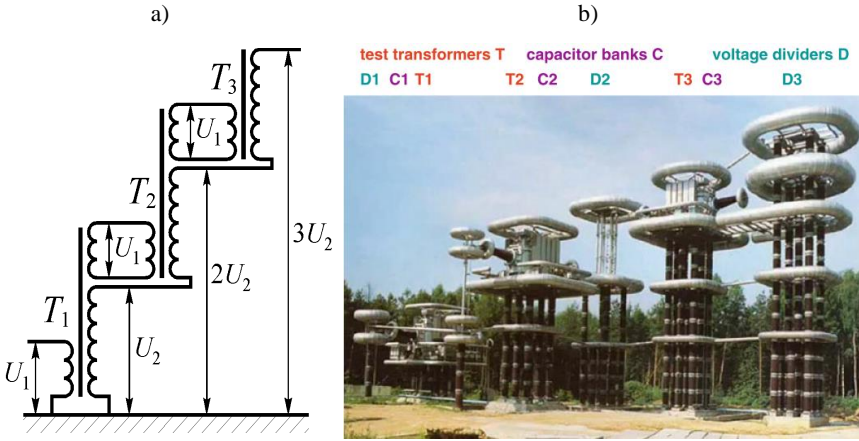


Figure 3.9 – Cascaded test transformers: a) circuit diagram; b) photograph

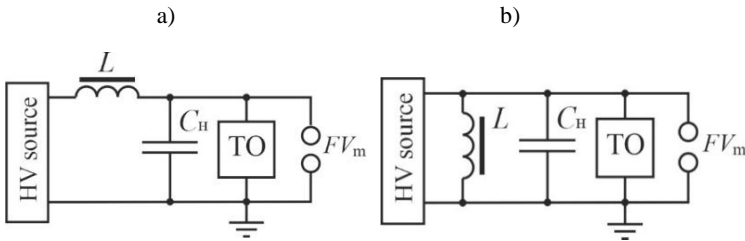


Figure 3.10 – Resonant circuits: a) series resonant circuit; b) parallel resonant circuit

It should be noted that in the dielectric testing practice, series resonant circuit is mainly used. An exception is testing objects with a very large capacity with relatively low voltage (for example, capacitor banks) when parallel resonant circuit is used.

The tests are performed once the circuit has been adjusted to resonance at the test voltage frequency. There are two possibilities to reach resonance: the first is to use a tunable reactor, and the second is to power the circuit via a frequency converter. Accordingly, in the first case, resonance is achieved by changing the inductance of the reactor (*inductance-tuned resonant circuit: ACRL*); in the second one, resonance is achieved by changing the power supply frequency (*frequency-tuned resonant circuit ACRF*).

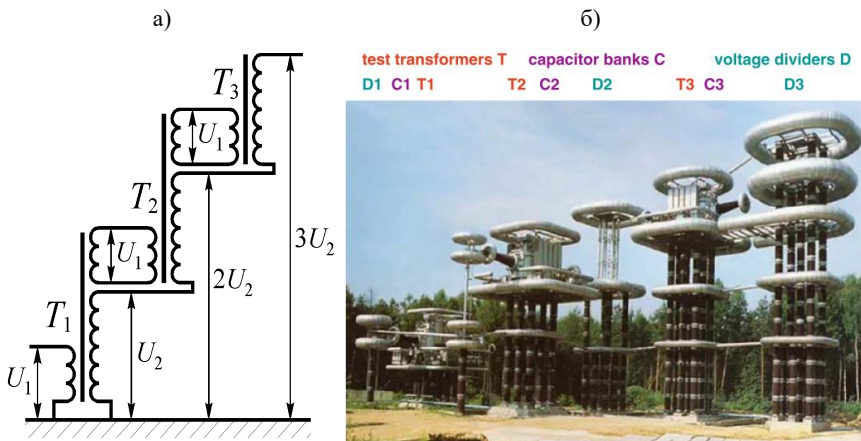


Рисунок 3.9 – Каскадне з'єднання випробувальних трансформаторів:
а) схема з'єднання; б) фотографія каскаду трансформаторів

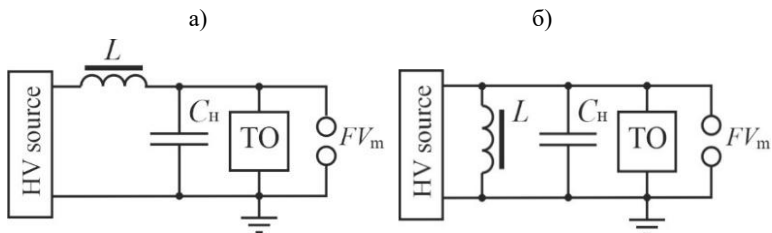


Рисунок 3.10 – Резонансні схеми: а) послідовне з'єднання реактора;
б) паралельне з'єднання реактора

Слід зазначити, що на практиці випробувань ізоляції використовуються головним чином схема з послідовним включенням реактора. Виняток становить випробування об'єктів з дуже великою ємністю та відносно низькою напругою (наприклад, конденсаторні батареї), коли застосовується схема з паралельним включенням реактора.

Випробування проводяться шляхом налаштування схеми в резонанс на частоті випробувальної напруги. Існує два способи налаштування схеми резонанс: перший – це використання реактора з регульованою індуктивністю, і другий – це живлення схеми через перетворювач частоти. Відповідно, у першому випадку резонанс досягається зміною індуктивності реактора; у другому – зміною частоти джерела живлення.

The main advantage of resonant circuits consists in that the secondary (output) voltage of the test transformer significantly less than the test voltage applied to test object TO. It gives substantial gain in mass, dimensions and cost of the test transformer and test setup as whole. In addition, the use of resonant circuits enables to avoid the formation of powerful arcs and inrush currents in the event of damage, since then the resonance in the circuit is disturbed and its resistance sharply increases.

The principal drawback of resonance circuits is the necessity of their readjustment in the case other type of the apparatus is tested. Nevertheless, the application of resonant circuits is perspective because it enables to construct cheap mobile setups for preventive-maintenance dielectric tests.

Induced voltage test. The induced voltage is the one of sine waveform of increased frequency ranging usually from 100 to 400 Hz. The main feature of this test is that the test object is a part of the test circuit. Power and measuring transformers are tested by induced voltage (IEC 60076-3: 2013). In this case, the test voltage is generated (induced) by the object itself (transformer) being tested when voltage is applied to its primary (usually low-voltage) winding. The low voltage of the supply must be matched the with the required test voltage and with the transformation ratio of the transformer under test. Since the transformer is the test circuit part, it should be taken into account that its characteristic is non-linear.

When the power frequency (50 or 60 Hz) voltage on the transformer primary winding is increased up to the value that in excess of the rated one, the core will saturate in accordance with the known relationship between the voltage and magnetic flux:

$$\Phi_m = \frac{U}{4,44 \cdot f \cdot w},$$

where w is the number of winding turns; f is the power source frequency.

In the process, the current in the winding will increase sharply whereas because of the limitation of the core flux, the voltage across its secondary winding will increase insignificantly. Thus, to achieve the required test voltage at the power frequency is practically impossible. Therefore, induced voltage test is usually performed at an increased frequency (at least twice the power frequency).

Основною перевагою резонансних схем полягає в тому, що напруга, що знімається з вторинної обмотки випробувальний трансформатор значно менше випробувальної, що дає істотний вигравш в масі, габаритах і вартості трансформатора і всієї випробувальної установки. Крім того, використання резонансних схем дозволяє уникнути утворення потужних дуг та кидків струму при пошкодженнях, оскільки в таких випадках порушується резонанс у колі та його опір різко зростає.

Основним недоліком резонансних схем є необхідність їх перелаштування при заміні випробуваного апарату, однак їх застосування є перспективним, тому що дозволяє розробляти дешеві мобільні установки для експлуатаційних випробувань ізоляції.

Випробування індукованою напругою. Індукована напруга являє собою напругу синусоїдальної форми підвищеної частоти від 100 до 400 Гц. Основною особливістю даного виду випробувань є те, що випробуваний об'єкт є частиною випробувального контуру. Цьому виду випробування піддаються силові та вимірювальні трансформатори (ІЕС 60076-3: 2013). У цьому випадку випробувальна напруга генерується (індукується) самим випробуваним об'єктом (трансформатором) при подачі напруги на його первинну (зазвичай низьковольтну) обмотку. Коло живлення повинно забезпечити узгодження низької напруги з необхідною випробувальною напругою і з коефіцієнтом трансформації випробуваного трансформатора. При цьому необхідно враховувати нелінійність характеристики трансформатора, оскільки він є частиною випробувального контуру.

При підвищенні напруги промислової частоти (50 або 60 Гц) на первинній обмотці трансформатора вище номінальної, сердечник буде насичуватися внаслідок відомого співвідношення між напругою та магнітним потоком:

$$\Phi_m = \frac{U}{4,44 \cdot f \cdot w},$$

де w – число витків обмотки; f – частота джерела живлення.

При цьому струм в обмотці різко зростатиме, а внаслідок обмеженого магнітного потоку в сердечнику, напруга на його вторинній обмотці зростатиме дуже повільно. Таким чином, необхідного значення випробної напруги при промисловій частоті досягти практично неможливо. Тому, випробування індукованою напругою зазвичай проводять при підвищеній частоті, яка щонайменше вдвічі перевищує промислову частоту.

It should be noted that at low frequencies, the transformer is an inductive load for the supply circuit, and at high frequencies, it is a capacitive one. At a certain frequency, called the frequency of *self-compensation*, the power consumed by the transformer is minimal. Just this frequency is most often chosen for testing. Induced voltage test is usually performed using the same circuit as power frequency voltage test (see Figure 3.7).

DC (rectified) voltage test. DC voltage for testing electrical and electronic apparatus is usually generated by rectification of AC voltage, so its instantaneous value periodically changes from a minimum U_{\min} to a maximum U_{\max} value. The value of the DC test voltage is defined as the arithmetic mean value of the periodically changing voltage $u(t)$ over the cycle T :

$$U_{DC} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt.$$

The change in its value is characterized by the ripple factor

$$k_r = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2U_{DC}},$$

which, according to the IEC standard [28], should not exceed $\pm 3\%$.

DC voltage is generally used to conduct two types of testing on electric insulation. The first is high-potential (hi-pot) voltage testing and the second is insulation resistance (leakage current) testing (see subsection 3.5). High-potential DC voltage testing is conducted for the insulation of powerful electric machines, surge arresters, power cables etc. rated above 1 kV. High-potential DC voltage also used:

- in researching the breakdown processes of different isolating materials, mediums and constructions;
- for the purpose of insulation maintenance (self-discharging curve measurements, return voltage of layer insulation measurements etc.);
- for burning through broken-down or weaken sections of HV cables for the purpose of the failure place detection and substitution of the failed sections and other purposes.

High-potential DC voltage test has a number of advantages:

1. DC (rectified) voltage is the less dangerous for insulation, breakdown voltage in this case is on average 1.5 times higher than at AC voltage.

Слід зазначити, що при низьких частотах трансформатор є індуктивним навантаженням для живильного кола, а при високих – ємнісним. При певній частоті, яка називається частотою самокомпенсації, потужність, що споживається трансформатором, мінімальна. Саме ця частота найчастіше вибирається для випробувань. При випробуванні індукованою напругою використовується та сама схема, що й при випробуваннях напругою промислової частоти (див. рис. 3.7).

Випробування постійною (випрямленою) напругою. Постійна напруга для випробування електричних та електронних апаратів створюється переважно шляхом випрямлення змінної напруги, отже її миттєве значення періодично змінюється від мінімальної $U_{\text{мін}}$ до максимальної $U_{\text{макс}}$ величини. Величина постійної випробної напруги визначається як середньоарифметичне значення періодично змінюваної напруги $u(t)$ за період T :

$$U_{DC} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt.$$

Змінення її величини характеризується коефіцієнтом пульсації

$$k_{\text{п}} = \frac{U_{\text{макс}} - U_{\text{мін}}}{2U_{DC}},$$

який згідно зі стандартами МЕК [28], не повинен перевищувати $\pm 3\%$.

Постійна напруга використовується при випробуваннях ізоляції у двох випадках. Перший – це високоевольтні випробування і другий – для вимірювання опору (струмів витоку) ізоляції (див. підрозділ 3.5). Високоевольтним випробуванням піддається ізоляція потужних електричних машин, розрядників, силових кабелів напругою понад 1 кВ. Висока постійна напруга також використовується:

- для дослідження процесів пробою різних ізоляційних матеріалів, середовищ та конструкцій;
- для цілей профілактики ізоляції (зняття кривих саморозряду; визначення "зворотної" напруги шаруватої ізоляції тощо);
- для пропалювання пробитих або ослаблених ділянок кабелів високої напруги з метою виявлення місця пошкодження та заміни пошкодженої ділянки та інших цілей.

Випробування постійною напругою має певні переваги:

1. Постійна (випрямлена) напруга менш небезпечна для ізоляції; пробивна напруга в цьому випадку вище в середньому в 1,5 рази, ніж при змінній напрузі.

2. The required power of high voltage rectifier installations considerably less than that AC ones, because of that movable installations are less large (cumbersome) and enable to test the objects offering large capacitance (cables, condensers, etc.).

3. Testing with DC voltage enable to measure leakage currents that are additional criterion to estimate the insulation conditions (see subsection 3.5).

The main drawback of testing with DC (rectified) voltage is the uneven distribution of voltage across the insulation thickness (because of its inhomogeneity), according to conductivity of its individual parts.

To rectify AC voltage, applied from a test transformer, *half-wave* or *full-wave* circuits are usually used. To increase the magnitude of the test voltage, *voltage doubler* and *multiplier circuits* are frequently used, such as *Greinacher/Cockcroft-Walton single-phase and cascade circuits*, as well as cascade circuits with an impulse generator [20–23].

Figure 3.11 shows a circuit diagram of the test setup for high-potential testing with DC voltage using the simplest single-phase half-waved voltage doubler rectifier.

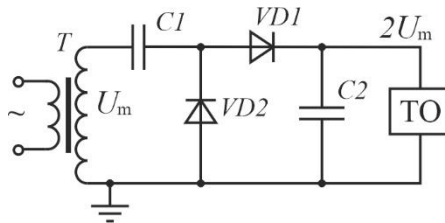


Figure 3.11 – Circuit diagram of setup with voltage doubler rectifier for high-potential testing with DC voltage

The circuit contains a test transformer T , a test object TO and a rectifier, which in turn contains two capacitors, doubler $C1$ and smoothing $C2$, and two diodes $VD1$ and $VD2$. Whenever the voltage polarity of the test transformer corresponds to the conductive state of the diode $VD1$, then the capacitor $C1$ is charged to the amplitude value U_m . When the transformer voltage polarity is opposite, the valve $VD2$ becomes conductive; in this half-cycle, the transformer voltage is added to the voltage of the charged capacitor $C1$. Thus, the voltage across the test object will be equal to approximately twice the amplitude of $2U_m$. It should be kept in mind that the reverse voltage across the diodes will also be equal to the doubled amplitude of $2U_m$.

2. Необхідна потужність випрямлювальних установок високої напруги значно менша, ніж установок змінної напруги, завдяки чому пересувні установки менш громіздкі і дають можливість проводити випробування об'єктів з великою ємністю (кабелів, конденсаторів та ін.).

3. При випробуванні постійною напругою є можливість вимірювання струмів витоку, що є додатковим критерієм оцінки стану ізоляції (див. підрозділ 3.5).

Основним недоліком випробування постійною (випрямленою) напругою є нерівномірний розподіл напруги по товщині ізоляції (через неоднорідність) залежно від провідності окремих її частин.

Для випрямлення змінної напруги, яка подається від випробувального трансформатора, за звичаєм використовуються однонапівперіодні або двонапівперіодні схеми. Для підвищення величини випробувальної напруги використовуються часто схеми з подвоєнням та множенням напруги: однофазні та каскадні схеми Грейнахера та Коккрофта-Уолтона, а також каскадні схеми з імпульсним генератором [20–23].

На рис. 3.11 надана схема установки для випробування постійною напругою з використанням найпростішого однофазного однонапівперіодного випрямляча з подвоєнням напруги.

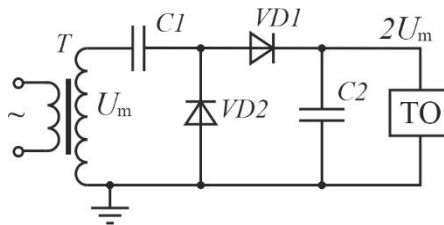


Рисунок 3.11 – Схема установки для випробувань постійною напругою з подвоєнням напруги

Схема містить випробувальний трансформатор T , випробуваний об'єкт TO та випрямляч, який, у свою чергу, містить два конденсатора, подвоювальний $C1$ та згладжувальний $C2$, та два діоди $VD1$ і $VD2$. Якщо полярність напруги випробувального трансформатора відповідає відкритому стану вентиля $VD1$, то конденсатор $C1$ заряджається до амплітудного значення U_m . При протилежній полярності напруги трансформатора відкривається вентиль $VD2$; у цей напівперіод до напруги зарядженого конденсатора $C1$ додається напруга трансформатора. Отже напруга на випробуваному об'єкті буде дорівнювати приблизно подвоєній амплітуді $2U_m$. Слід мати на увазі, що зворотна напруга на вентилях також буде дорівнювати подвоєній амплітуді $2U_m$.

Based on the voltage doubler circuit, a voltage multiplier circuit is constructed to generate a DC voltage higher than 200 kV, which shown in Figure 2.12. Such a circuit enables significantly reduce the dimensions of the test setup in comparison with single-cascade rectification circuits. The voltage across the test object in this case will be is equal to:

$$U_{\text{out}} = 2 \cdot n \cdot U_m,$$

where n is the number of steps (doubler circuits).

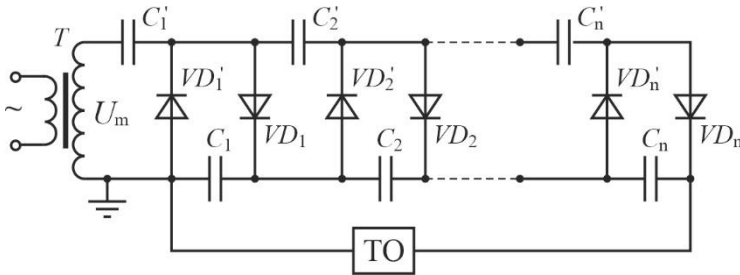


Figure 3.12 – Circuit diagram of the setup for high-pot DC voltage testing using multiplier rectifier

High-pot DC voltage can also be generated using electrostatic machines (Van de Graaf generator and electrostatic generator). It should be noted their significant advantage, which consists in the fact that very high voltages (up to 30 MV) are generated quite easily with no pulsations. Their significant drawback is low output power. These generators are used mainly in nuclear research laboratories [20–23].

Testing procedure. High-pot testing of the insulation of electrical and power electronic apparatus, in particular, testing by the applied voltage is usually performed after preliminary inspection and checking the insulation condition with the help of megohmmeter and other indirect additional methods (measurements of $\tan\delta$, $\Delta C/C$, C_2/C_{50} etc.) provided that their outcomes are positive. In the cases, when the insulation is tested with both sine and DC (rectified) voltages, the DC voltage test shall precede the AC voltage test.

Power frequency test voltage is applied to an object being tested in such sequence. It is started at one-third or of less value and then is increased gradually, but sufficiently rapidly (no more than 15 s) to full value of the test voltage. After being held for the predetermined time span (in the range of one to five minutes), the voltage is gradually in not more than 15 s to one-third of the maximum value or less and the circuit is opened.

На основі схеми подвоєння напруги будується схема помноження напруги для отримання постійної напруги вище за 200 кВ, рис. 2.12. Така схема дозволяє суттєво зменшити габарити випробувальної установки у порівнянні з однокаскадними схемами випрямлення. Напруга на випробуваному об'єкті у цьому випадку буде дорівнювати:

$$U_{\text{вих}} = 2 \cdot n \cdot U_m,$$

де n – кількість ступенів (схем подвоєння).

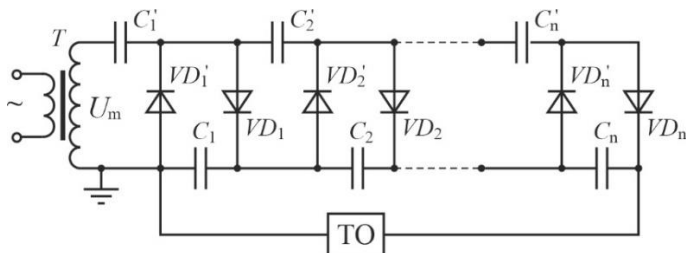


Рисунок 3.12 – Схема установки для випробувань постійною напругою з помноженням напруги

Висока постійна напруга може бути отримана також за допомогою електростатичних машин (генератор Ван де Графа та електростатичний генератор). Слід відзначити їх суттєву перевагу, яка полягає у тому, що досить легко забезпечуються дуже високі напруги (до 30 МВ) при відсутності пульсацій. Їх суттєвим недоліком є мала вихідна потужність. Ці генератори використовуються, головним чином, у лабораторіях ядерних досліджень [20–23].

Методика випробувань прикладеною напругою. Випробування ізоляції електричних та електронних апаратів підвищеною і, зокрема, прикладеною напругою проводиться після попереднього огляду та перевірки стану ізоляції за допомогою мегомметра та інших непрямих додаткових методів (вимірювання $\text{tg}\delta$, $\Delta C/C$, $C2/C50$) при позитивних результатах цієї перевірки. У тих випадках, коли випробування ізоляції проводиться як змінною, так і постійною (випрямленою) напругою, випробування постійною напругою має передувати випробуванню змінною напругою.

Випробувальна напруга промислової частоти подається до випробуваного об'єкта у наступній послідовності. Спочатку поштовхом подається 1/3 (або менше) випробувальної напруги; потім напруга плавно (не більше 15 секунд) збільшується до випробувальної. Після здійснення заданої витримки часу (від 1 до 5 хв) напруга плавно (не більше 15 секунд) знижується до 1/3 (або менше) випробувальної напруги, а потім відключається.

DC (rectified) voltage is applied in the same manner, except that full value is held for longer time (in the range of 10 to 20 min.).

The internal insulation of equipment, except for gas-filled ones, is tested with a one-minute power frequency withstand voltage. In this case, the test voltage is one-time applied for one minute according to the sequence noted above. The external insulation, as well as internal insulation of gas-filled equipment is tested with gradually stepping voltage. In this case, the test voltage 3 times is applied to an object being tested in the same sequence, but with no time lag. The external insulation is also tested under rain in the same manner. The results of applied withstand voltage tests are positive, if there were no full discharges or other failures of the insulation in the process.

3.5 Other Techniques of Dielectric Research and Tests

Besides high-pot testing, there are a number of other techniques to check the condition of insulation. These techniques, by contrast with high-pot testing, mostly are not involved with the application of voltages, which significantly exceed the rated operating value and are therefore gentle for an insulation. Nevertheless, the employment of such techniques enables determine a number of very important features and characteristics of insulating gaps and, in general, insulating structures of electrical and power electronic apparatus.

Partial discharge measurements. *Partial discharge* (PD) is a local spark discharge of very low power, produced by high-voltage stress within the solid insulation or on its surface. Partial discharge bridges usually a very small portion of the insulation gap. However, when partial discharges are periodically repeated, the insulation condition gradually (usually over several months or even years) deteriorates, which can lead to a breakdown or flashover of the insulation gap. By this why now the questions of partial discharge measurements have received considerable attention.

Recording partial discharges, evaluation of their power and repeatability, as well as localization of their places of appearance allow in proper time to detect progressing failure of insulation and to take required measures for their elimination. It should be noted that the partial discharge measurement is a non-destructive test of insulation, so it can be used to evaluate the insulation performance at the beginning of its service life. Now the programs and procedures of acceptance tests for high-voltage apparatus specify the measurements of certain parameters of partial discharges. The main specifying document defining the partial discharge measurements now is [29].

Випробування ізоляції постійною (випрямленою) напругою здійснюється аналогічно, але витримка часу більш тривала (від 10 до 20 хв).

Випробування внутрішньої ізоляції апаратів, крім газонаповнених, здійснюється однохвилинною напругою промислової частоти (одноразовим прикладенням випробувальної напруги з однохвилинною витримкою часу). Випробування зовнішньої ізоляції, а також внутрішньої ізоляції газонаповнених апаратів проводиться напругою при плавному підйомі (3-кратним прикладенням випробувальної напруги без витримки часу). Аналогічно виконується випробування зовнішньої ізоляції під дощем. Результати випробувань напругою промислової частоти вважаються позитивними, якщо в їх процесі не відбувалося повних розрядів чи інших ушкоджень ізоляції.

3.5 Інші методи дослідження та випробування ізоляції

Поряд з випробуваннями підвищеною напругою існує ряд інших методів перевірки стану ізоляції. На відміну від випробувань підвищеною напругою, ці методи переважно не пов'язані з використанням напруги, що значно перевершує номінальне робоче значення, отже є щадним для ізоляції. Тим не менше, їх використання дозволяє визначити ряд дуже важливих властивостей і характеристик ізоляційних проміжків і, у цілому, ізоляційних конструкцій електричних та електронних апаратів.

Вимірювання параметрів часткових розрядів. *Частковий розряд* (ЧР) – це локальний іскровий розряд дуже малої потужності, що утворюється всередині твердої ізоляції (або на її поверхні) під дією високої напруги. ЧР перебиває як правило дуже малу частину ізоляційного проміжку апарату. Проте, при періодичному їх повторенні відбувається поступове (зазвичай протягом кількох місяців, і навіть років) погіршення стану ізоляції, що може привести до пробію або перекриття ізоляційного проміжку. Тому у нинішній час питанням вимірювання параметрів часткових розрядів приділяється велика увага.

Реєстрація часткових розрядів, оцінка їх потужності і повторюваності, а також локалізація місця їх виникнення, дозволяє своєчасно виявити пошкодження ізоляції, що розвиваються, і вжити необхідних заходів для їх усунення. Слід зазначити, що вимірювання часткових розрядів є неруйнуючим методом випробування ізоляції, отже його можна використовувати для оцінки характеристик ізоляції на початку її терміну служби. В даний час програмами та методиками прийнятно-здавальних випробувань високовольтних апаратів передбачається вимірювання окремих параметрів часткових розрядів. Основним нормативним документом, що визначає методику вимірювання параметрів ЧР, на даний час є [29].

The main assignment of the measurements is to find the partial discharge rate featured usually by the following parameters:

- *apparent charge of single PD* is the charge that must be instantly "injected" (applied) into the test object so that the voltage across its electrodes has changed by the same value as under action of a real PD. The charge is called "apparent charge" because in magnitude it is not equal to the true charge magnitude of the real PD. The measurement of an apparent charge of single PD consists in determining the response of the test object to the arisen PD in the circuit

- *PD repetition frequency*;

- *PD average current* is the total charge of partial discharges, recorded in the test object per one second; on average, this current is purely active and characterizes losses in insulation caused by appearance of the partial discharges.

To estimate the partial discharge rate, other parameters also can be additionally used, such as *square-law characteristic*, *power* and *total charge* per given time span. The prevalent methods to detect partial discharges today are electrical, electromagnetic (distance, microwave) and acoustical. Besides these, there are also chemical, optical or optoelectronic and thermal methods.

Electrical method has received most extensive application at the present day. IEC Standard [29] specifies just this method. Fundamentally, this method is based on the measurement of changing the charges of the measuring circuit components caused by partial discharges in the test object. There are a number variations of the circuits for partial discharge measurements; one of them is shown in Figure 3.13.

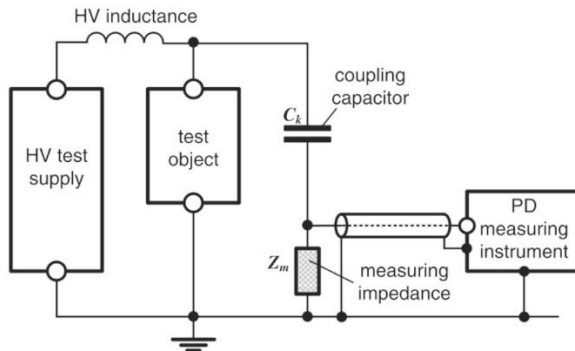


Figure 3.13 – Circuit diagram for PD measurements [20]

Основним завданням вимірювань є визначення інтенсивності ЧР, яка характеризується такими параметрами:

- *позірний (уявний) заряд одиничного ЧР*: під позірним зарядом розуміють такий заряд, який необхідно миттєво «впорснути» у досліджуваний апарат, щоб напруга між його електродами змінилася на таку ж величину, як і при виникненні реального ЧР; заряд названий "позірним", оскільки він за величиною не дорівнює істинному значенню реального ЧР; вимірювання позірного заряду одиничного ЧР полягає у визначенні реакції досліджуваного апарата на ЧР, що виникає у ньому;
- *частота проходження ЧР*;
- *середній струм ЧР* являє собою суму зарядів часткових розрядів, що зареєстровані у досліджуваному об'єкті за одну секунду; у середньому, цей струм є суто активним і характеризує втрати в ізоляції через виникнення часткових розрядів.

Для оцінки інтенсивності ЧР додатково можуть використовуватися інші параметри: *квадратичний параметр*; *потужність*, а також сумарний заряд за *заданий інтервал часу*. Основними методами виявлення ЧР на сьогоднішній день є: *електричний*, *електромагнітний (дистанційний, НВЧ-метод)* та *акустичний*. Поряд із ними існують також *хімічний*, *оптичний (оптоелектронний)* та *термічний*.

Електричний метод набув у нинішній час найширше використання. Саме цей метод нормується стандартом МЕК [29]. Принципово він заснований на вимірюванні змінення зарядів елементів вимірювальної схеми, викликаних ЧР у досліджуваному об'єкті. Існує декілька схем вимірювання параметрів ЧР; одна з них надана на рис. 3.13.

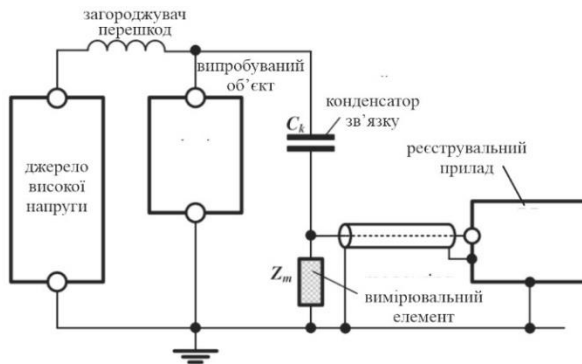


Рисунок 3.13 – Схема вимірювання характеристик часткових розрядів [20]

The circuit contains a HV test supply (test transformer), HV inductance (a noise-blocking filter), test object, and the measuring impedance Z_m , which is connected in series with coupling capacitor C_k . The measuring circuit, besides the measuring impedance (amplifier-discriminator), usually contains a low-frequency blocking filter, an oscilloscope and a pulse counter. When the partial discharge occurs, the measuring instrument records a stepped decrease in voltage across the test object. In the process, the voltage pulses across measuring impedance are generated. The pulse amplitude is:

$$\Delta U_{in} \approx \Delta U_{TO} = \frac{q_{PD}}{C_{TO}}.$$

This expression is valid under the following conditions:

$$C_{MI} \ll C_{TO}; \quad C_{MI} \ll C_k,$$

where C_{MI} is the self-capacitance of the measuring circuit.

Hence, the apparent charge will be determined by the following formula:

$$q_{PD} = \Delta U_{TO} \cdot C_{TO}.$$

The main advantages of this method are the following:

- it allows to measure the most characteristics of partial discharges;
- it is non-stressing for the apparatus insulation;
- it ensures a sufficiently high sensitivity

The main disadvantage of the method is firstly the availability of contact of measuring devices with the test object and, secondly, the necessity to utilize a number of measures and special-purpose equipment to avoid noises that makes it not most simple and convenient. Now there are various producers of equipment, in which this method is used; the main ones are HVPD, SebaKMT and others.

Electromagnetic (distance, microwave) method. Detection of partial discharges in this case is carried out with the help of directive receiving microwave aerial device (scanner). An essential advantage of this method is that its application does not require a contact with the object of measurements. Therefore, it can be used to diagnose equipment with any voltage rating. The disadvantages are no quantitative estimation of the number of partial discharge characteristics, as well as the influence of electromagnetic radiation from other devices.

Схема містить джерело високої напруги, індуктивність, яка виконує функцію загороджувача перешкод, випробуваний об'єкт, а також вимірювальний елемент (перетворювач) Z_m , включений послідовно з конденсатором зв'язку C_k . Вимірювальний пристрій, окрім вимірювального перетворювача (підсилювач-дискримінатор) зазвичай містить, загороджувальний фільтр низьких частот, осцилограф та лічильник імпульсів. У схемі реєструється стрибкоподібне зниження напруги на досліджуваному об'єкті при виникненні ЧР. При цьому на вимірювальному елементі виникають імпульси напруги з амплітудою, яка визначається за наступним виразом:

$$\Delta U_{in} \approx \Delta U_{TO} = \frac{q_{PD}}{C_{TO}}.$$

Наданий вираз є справедливим за наступних умов:

$$C_{MI} \ll C_{TO}; \quad C_{MI} \ll C_k,$$

де C_{MI} – власна ємність вимірювального пристрою.

Отже, позірний заряд визначається за наступною формулою:

$$q_{PD} = \Delta U_{TO} \cdot C_{TO}.$$

Основними перевагами даного методу є наступні:

- дозволяє знімати найбільшу кількість характеристик ЧР;
- щадний для ізоляції апарата;
- забезпечує досить високу чутливість.

Основними недоліками методу є, по-перше, наявність контакту вимірювальних приладів з досліджуванним об'єктом і, по-друге, необхідність застосування комплексу заходів та спеціального обладнання для відлаштування від перешкод, що є досить складною проблемою. В даний час існує велика кількість виробників обладнання, в якому застосовується даний метод; основними виробниками є HVPD, SebaKMT.

Електромагнітний (дистанційний, НВЧ) метод. Виявлення часткових розрядів у даному випадку здійснюється за допомогою спрямованого приймального НВЧ антенного пристрою. Істотною перевагою даного методу є те, що його застосування не вимагає контакту з об'єктом виміру, тому він може використовуватися для контролю обладнання практично будь-якого класу напруги. Недоліками є відсутність кількісної оцінки характеристик ЧР, а також вплив на електромагнітне випромінювання інших приладів.

The *acoustic method* is mainly used to detect the source of partial discharges in such equipment as power and instrument transformers, gas-insulated equipment etc. For this purpose, supersensitive microphones are used. They trap sound waves in the frequency range that in excess of hearing threshold. The apparent simplicity of the method does not exclude great difficulties to detect the location of partial discharges appearance. The main disadvantage of this method is low sensitivity in recording the low intensity partial discharges. Nevertheless, this method has the advantage that it is distance one and allows place sensors in outdoor constructions, such as switchgear panels and busducts.

Now, the works aimed to improve the electromagnetic and acoustic methods are carried out for the purpose to approach their application to operating conditions. Just today, these methods enable to investigate equipment with recording the found values during a long time and sending them to the operator by means of communication networks.

The wide application of the methods related to recording partial discharges is constrained because of complicated measuring techniques, the high expensive equipment and the small number of specialists who can work with this equipment.

Partial discharge test is usually performed for the apparatus manufactured for nuclear power stations; in other cases, it is made at the request of the customer. The test is conducted by applying a voltage that is 1.35 times the nominal operating voltage for 10 seconds and then reducing it to the nominal operating voltage. In the process, the intensity of partial discharges should not exceed 10 pC per 1 minute.

Dielectric losses measurements. The *dielectric power factor* or *loss factor* $\tan\delta$ is one of the most important quantities allowing determine the isolating properties of different materials, as well as quality of isolating constructions of electrical and power electronic apparatus. As it is well-known that $\tan\delta$ is the ratio:

$$tg\delta = \frac{I_a}{I_c},$$

where I_a , I_c is respectively, active and reactive component of the current flowing through the insulation gap under applied AC voltage.

Multiplying the numerator and denominator to the value of the applied voltage, as well as taking into account the value of the capacitive current through the gap:

Акустичний метод застосовується головним чином для виявлення джерела ЧР в апаратах, наприклад, силових та вимірювальних трансформаторах, елегазових розподільних пристроях. Для їх знаходження використовуються надчутливі мікрофони, які вловлюють звукові хвилі, розташовані в діапазоні частот вище за поріг чутності. Даний метод є дистанційним і дозволяє розташовувати датчики та сенсори у відкритих конструкціях, наприклад, комірках комплектних розподільних пристроїв та шинопроводах. Недоліком методу є мала чутливість при реєстрації часткових розрядів малої інтенсивності, а також труднощі у виявленні місця виникнення ЧР.

В даний час ведуться роботи з удосконалення електромагнітного та акустичного методів, щоб наблизити їх застосування до умов експлуатації. Вже зараз дані методи дозволяють проводити обстеження з реєстрацією значень, що отримуються, протягом тривалого періоду і відправкою їх оператору по мережах зв'язку.

Широкое застосування методів реєстрації ЧР стримується через складність методики вимірювання, дорожчі обладнання та малої кількості фахівців, здатних працювати з відповідним обладнанням.

Випробування на інтенсивність часткових розрядів проводять за звичаєм для апаратів, що виготовляються для АЕС; в інших випадках воно проводиться на вимогу замовника. Випробування проводиться прикладенням напруги, яка складає 1,35 від номінальної робочої протягом 10 с та подальшим його зниженням до номінальної робочої. При цьому інтенсивність часткових розрядів має не перевищувати 10 пКл протягом 1 хв.

Вимірювання тангенса кута діелектричних втрат. Тангенс кута діелектричних втрат ($tg\delta$) є одним із найбільш важливих показників, що дозволяє визначати ізоляційні властивості ізоляційних матеріалів, а також якість ізоляційних конструкцій електричних та електронних апаратів. Як відомо, $tg\delta$ являє собою відношення активної складової струму I_a , що проходить через ізоляційний проміжок при прикладенні до нього змінної напруги, до реактивної складової I_c :

$$tg\delta = \frac{I_a}{I_c}$$

Помножуючи чисельник і знаменник на величину прикладеної напруги, а також враховуючи величину ємнісного струму через проміжок:

$$I_c = U \cdot \omega C,$$

we obtain the following expression:

$$tg\delta = \frac{I_a \cdot U}{I_c \cdot U} = \frac{P_a}{U \cdot \omega C}.$$

Hence, the value of active losses that defines the insulation quality determined from this expression will be as follows:

$$P_a = U^2 \omega C \cdot tg\delta,$$

From this expression, it follows that at constant values of U and C , the value of P_a is proportional to $\tan\delta$. Thus, the more defects the insulation contains, the greater the active losses will be in it, and, correspondingly, the greater the $\tan\delta$ will be.

The loss tangent is usually measured with the help of bridged circuits constructed using the Schering principle. Accordingly, the circuit for loss tangent measurements received the name *Schering bridge circuit*. In testing setups, bridges of types P5026, МД-16 and P595 have most extensive application. The $\tan\delta$ value of the insulation is measured at a voltage equal to the nominal voltage of the object, but not higher than 10 kV. When the nominal voltage of the object is less than 6 kV, measurements are performed at a voltage of 220–380 V. The circuit diagram for loss tangent measurements is shown in Figure 3.14.

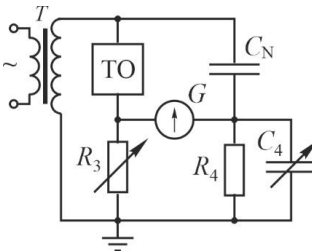


Figure 3.14 – Circuit diagram of Schering Bridge

The circuit contains a test transformer T that is usually voltage transformer HOM-6 or HOM-10. The object to be tested TO is connected into one of the bridge arms. The important component of the circuit is standard (reference) capacitor C_N that is the capacitor, of special design, filled usually by pressurized gas. Figure 3.15 shows photograph and structural scheme of the reference capacitor.

The circuit contains also the components providing the dielectric loss tangent measurement, such as resistors R_4 and R_3 with constant and variable resistance, respectively, as well as capacitor box C_4 . The dielectric loss tangent for this circuit is determined by the following expression:

$$tg\delta = \omega R_4 C_4,$$

$$I_c = U \cdot \omega C,$$

отримаємо наступне:

$$tg\delta = \frac{I_a \cdot U}{I_c \cdot U} = \frac{P_a}{U \cdot \omega C}.$$

Звідси величина активних втрат, що визначає якість ізоляції, буде виражатися наступною формулою:

$$P_a = U^2 \omega C \cdot tg\delta,$$

з якої випливає, що при постійних значеннях U та C величина P_a пропорційна $tg\delta$. Отже, чим більше дефектів містить ізоляція, тим більше активні втрати в ній і, відповідно, більше $tg\delta$.

Вимірювання $tg\delta$ здійснюється, як правило, за допомогою мостових схем, пристрій яких заснований на принципі Шерінга. Відповідно, схеми вимірювання діелектричних втрат отримали назву *міст Шерінга*. У випробувальних установках широкого поширення набули мости Р5026, МД-16 та Р595. Значення $tg\delta$ ізоляції вимірюють при напрузі, що дорівнює номінальній напрузі об'єкта, але не вище 10 кВ. При номінальній напрузі об'єкта менше 6 кВ вимірювання проводять при напрузі 220-380 В. Схема вимірювання тангенсу кута діелектричних втрат надана на рис.3.14.

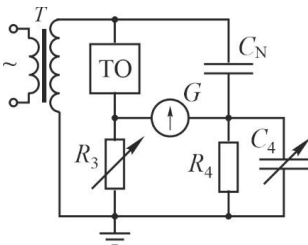


Рисунок 3.14 – Схема мосту Шерінга для вимірювання $tg\delta$

Схема містить випробувальний трансформатор T ; зазвичай використовують трансформатори напруги НОМ-6 або НОМ-10. До одної з плечей моста підключається випробуваний об'єкт TO . Найбільш важливим елементом схеми є т.з. еталонний (зразковий) конденсатор C_N , який являє собою конденсатор спеціальної конструкції, заповнений елегазом під тиском. Фотографія та конструктивна

схема еталонного конденсатора надана на рис.3.15.

Схема містить також елементи, що забезпечують визначення $tg\delta$: резистори R_4 та R_3 з постійним та регульованим опором, відповідно, а також магазин ємностей C_4 . Тангенс кута діелектричних втрат для даної схеми визначається наступним виразом:

$$tg\delta = \omega R_4 C_4,$$

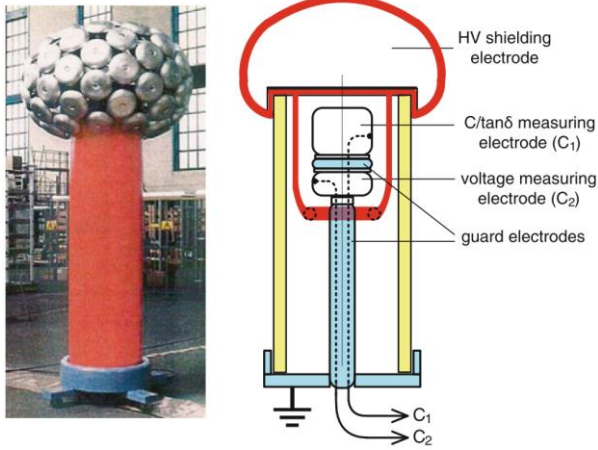


Figure 3.15 – Photograph and structural diagram of 800 kV, 100 pF reference capacitor [20]

where C_4 is the value of capacitance obtained under condition of the bridge equilibrium.

Thus, the measured $\tan\delta$ is proportional to the capacitance C_4 , which changes to balance the bridge.

There are advanced circuits and means for dielectric loss measurements. Figure 3.16 shows simplified circuit to measure $\tan\delta$ based on the digital recorder with the use of the system of digital signal processing (DSP).

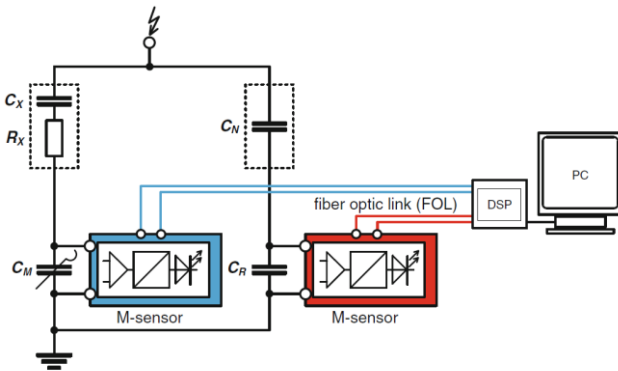


Figure 3.16 – Computerized DSP-based $\tan\delta$ measuring system [20]

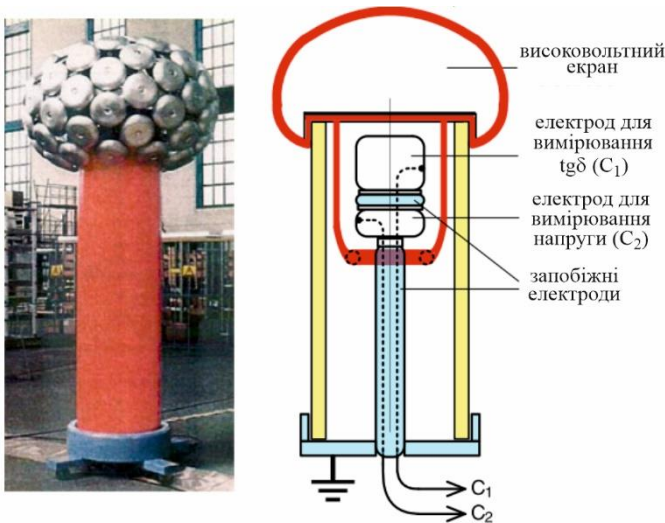


Рисунок 3.15 – Фотографія та конструктивна схема еталонного конденсатора (номінальна напруга 800 кВ, номінальна ємність 100 пФ) [20]

де R_4 та C_4 – величини, що здобуваються при рівновазі мосту.

Отже, вимірюваний $tg\delta$ пропорційний ємності C_4 , що змінюється для врівноваження мосту.

Існують сучасні схеми та засоби вимірювання діелектричних втрат. На рис. 3.16 надана спрощена схема вимірювання $tg\delta$ побудована на базі цифрового реєструвального пристрою з використанням системи цифрової обробки сигналів (DSP – digital signal processing).

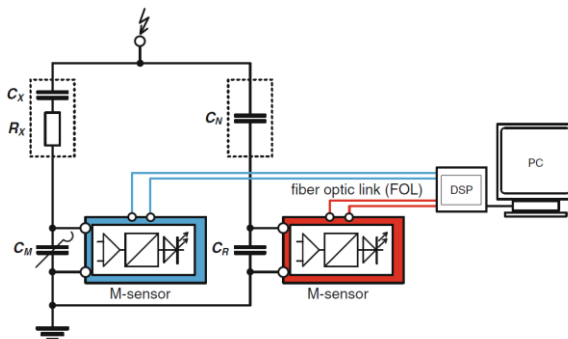


Рисунок 3.16 – Комп'ютеризована система вимірювання діелектричних втрат на основі DSP [20]

The HV circuit consists of two parallel branches, which, in fact, are voltage dividers. The measuring branch contains the test object (C_x - R_x) and the measuring capacitor C_M . The reference circuit contains a reference (standard) capacitor C_N and a low-voltage capacitor C_R . Measurement of $\tan\delta$ in this case does not require circuit balancing; it is determined by measuring the voltages across C_M and C_R , as shown in Figure 3.17.

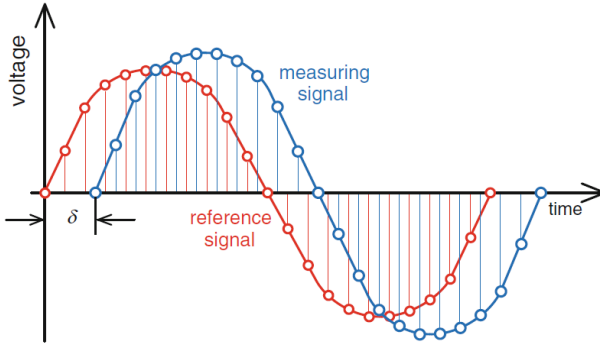


Figure 3.17 – Digitalization of the reference and measuring signal used by DSP-based $\tan\delta$ measuring system [20]

The measurement findings of $\tan\delta$ are strongly influenced by stray currents and external (electromagnetic and electrostatic) fields. In order to preclude these effects, the measuring circuit components are carefully shielded and some other measures are made. The measurement findings $\tan\delta$ are compared with admissible values.

Leakage current and DC-resistance testing. DC resistance and leakage current are the important indicators characterizing the conditions of insulation of electrical and power electronic apparatus. DC resistance considerably decreases when obvious defects, such as surface pollution, humidification, mechanical damages etc., are available in solid insulation.

DC-resistance is found by means of measuring the leakage current I_{leak} passing through the insulation gap under applying the rectified voltage U_{app} :

$$R_{\text{DC}} = \frac{U_{\text{app}}}{I_{\text{leak}}}$$

Високовольтна частина схеми складається з двох паралельних віток, які, по суті, є ділниками напруги. Вимірювальна вітка містить випробуваний об'єкт (C_x-R_x) та вимірювальний конденсатор C_M . Еталонна вітка містить еталонний (зразковий) конденсатор C_N та низьковольтний конденсатор C_R . Вимірювання $tg\delta$ у даному випадку не потребує врівноваження схеми; він визначається вимірюванням напруг на C_M та C_R , як показано на рис. 3.17.

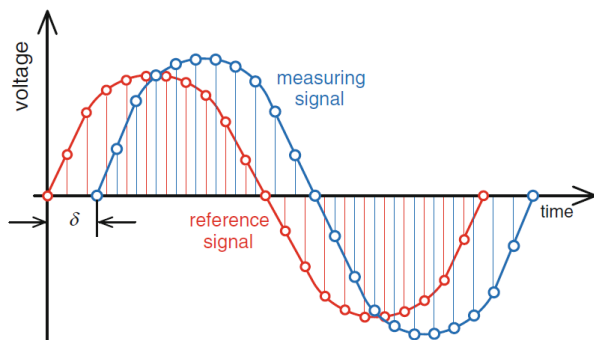


Рисунок 3.17 – Цифровізація еталонного та вимірювального сигналів, що визначають $tg\delta$ на основі DSP [20]

На результати вимірювань $tg\delta$ суттєво впливають паразитні струми та зовнішні (електромагнітні та електростатичні) поля. Для їх усунення здійснюється ретельне екранування вимірювального пристрою та ряд інших заходів. Результати вимірів $tg\delta$ порівнюють з допустимими значеннями.

Вимірювання струмів витoku та опору. Струм витoku та опір постійному струму є важливими показниками, що характеризують стан ізоляції електричних та електронних апаратів. Наявність явних дефектів твердої ізоляції (поверхнєве забруднення, зволоженість, механічні ушкодження і т.п.) значно знижують її опір.

Визначення опору ізоляції постійному струму здійснюється вимірюванням струму витoku $I_{\text{вит}}$, що проходить через ізоляційний проміжок при прикладенні до нього випрямленої напруги $U_{\text{пр}}$:

$$R_{\text{із}} = \frac{U_{\text{пр}}}{I_{\text{вит}}}$$

It should be noted that leakage current and, respectively, DC-resistance essentially depend on how long the voltage is applied. It occurs because to the *polarization* phenomena, which takes place in insulation structures of electric apparatus. The leakage current measurement is correct if it is taken after 60 s since the voltage is applied, that is, by the moment when *absorption (polarization) current* fully has decayed. The value of DC-resistance in high degree depends on the temperature. Therefore, it is measured at the insulation temperature not below +5°C, unless otherwise specified.

The main facilities for measuring R_{DC} are megohmmeters graduated in unities of DC-resistance. At the present time the most typical application is electronic-based megohmmeters of types $\Phi 4101$ and $\Phi 4102$ by the voltages 100, 500 and 1000 V supplied from AC network 127, 220 V or DC source 12 V. Until the present day, megohmmeters of types M4100/1–M4100/5 and MC-05 by voltages 100, 250, 500, 1000 and 2500 V are also used in operation practice of electrical and power electronic apparatus. They are fed from the built-in generator driven manually or electrically.

The resultant DC-resistance measurements enable to establish the degree of insulation humidification determined for the most part by means from so-called *dielectric absorption ratio (DAR)*:

$$DAR = \frac{R_{60}}{R_{15}},$$

where R_{60} , R_{15} is the DC resistance after 60 s and 15 s, respectively, since the voltage is applied to the insulation gap.

If the insulation is dry then $DAR \gg 1$; for humidified insulation it is close to one. This is explained by difference in polarization processes and, accordingly, by the difference in charging time of the insulation gap capacitance. In the first case, the charging time is long and accordingly R_{60} and R_{15} essentially differ; in the second case, the charging time is fairly short, the current changes rapidly and during 15 s practically ranges up of steady-state value, and therefore R_{15} and R_{60} are almost no different.

The indicator of the insulation humidification is also the *nonlinearity coefficient*, which is the ratio of the insulation resistances at various values of the applied voltage:

$$k_{\text{non}} = \frac{R_{DC}(0,5U_{\text{nom}})}{R_{DC}(U_{\text{test}})},$$

Слід зазначити, що струм витоку i , відповідно опір ізоляційного проміжку істотно залежить від часу з моменту прикладення напруги. Це пов'язано з явищем *поляризації*, що спостерігається в ізоляційних конструкціях апаратів. Правильним вважається результат вимірювання струму витоку, отриманий через 60 секунд після прикладення напруги, тобто до моменту повного згасання *струму поляризації (абсорбції)*. Значення опору ізоляції великою мірою залежить від температури. Тому її вимірювання проводять при температурі ізоляції не нижче $+5^{\circ}\text{C}$, крім випадків, обумовлених спеціально.

Основними вимірювальними засобами визначення опору ізоляції є мегомметри, відградуйовані у значеннях опору постійному струму. Широке застосування у випробних установках в даний час набули електронні мегомметри типу Ф4101, Ф4102 на напругу 100, 500 і 1000 В, що живляться від мережі змінного струму 127-220 В або джерела постійного струму 12 В. У практиці експлуатації електричних та електронних апаратів до теперішнього часу застосовуються також мегомметри М4100/1–М4100/5 та МС-05 на напругу 100, 250, 500, 1000 і 2500 В з живленням від вбудованого генератора, що приводиться до обертання рукою або електроприводом.

Результати вимірювань опору ізоляції постійному струму дозволяють встановити ступінь зволоження ізоляції, що визначається найчастіше за допомогою т.з. *коефіцієнта абсорбції*, що визначається наступним співвідношенням:

$$k_{\text{абс}} = \frac{R_{60}}{R_{15}},$$

де R_{60} і R_{15} – опір ізоляційного проміжку, вимірюного відповідно через 60 і 15 секунд з моменту прикладення до нього напруги.

Якщо ізоляція суха, то $k_{\text{абс}} \gg 1$, у вологій ізоляції він близький до 1. Це пояснюється різницею процесів поляризації і, відповідно, різницею в часі заряду ємності ізоляційного проміжку. У першому випадку час заряду великий, отже величини R_{15} та R_{60} значно відрізняються; у другому – струм абсорбції швидко досягає сталого значення, і вони майже не відрізняються.

Ступінь зволоження ізоляції може бути визначена за допомогою *коефіцієнта нелінійності*, який являє собою відношення опорів ізоляції при різних величинах прикладеної напруги:

$$k_{\text{н}} = \frac{R_{\text{із}}(0,5U_{\text{н}})}{R_{\text{із}}(U_{\text{випр}})},$$

where U_{nom} , U_{test} is the nominal and test voltage of the insulation gap, respectively.

The resultant leakage current measurement also enable to estimate the degree of the insulation humidification. In this case it is carried out by taking the characteristic $I_{\text{leak}} = f(U_{\text{app}})$. Humidified insulation will have nonlinear behavior due to the intensification of ionization processes under increasing the applied voltage U_{app} and, respectively, drastic increase in leakage current I_{leak} .

Visible discharge (corona) test. The presence or absence of a visible corona discharge is an important indicator of the condition of the apparatus' external insulation. The test is carried out by power frequency voltage using the same circuit (see Figure 3.7). The insulation is tested in a dry conditions in blacked out HV laboratory or outdoor at nighttime. The voltage across the test object is gradually increased smoothly to 110–120% of the visual corona voltage, and then is decreased to the specified test voltage. The availability of corona is determined visually or by photographing.

Thermal breakdown test. This test is performed in the cases when thermal breakdown is possible. For example, when the fibrous organic insulation is used as the main one. In the test process, the insulation undergoes applying power frequency test voltage until the steady-state value of the dielectric loss tangent is established.

Dielectric testing of low-voltage apparatus and controlgear. In compliance with standards [8, 17, 32, 36, 37] and Specs for certain devices, the main requirements imposed upon the insulation of electrical and power electronic apparatus rated 1000 V and lower, as well as control, blocking, signaling circuits are, firstly, a requirement for its electrical strength and, secondly, the requirement for its electrical resistance. Hence, the main test types in this case are testing the electrical strength of the insulation (applied withstand voltage test) and measuring its resistance.

Withstand voltage test (electrical strength test) is usually conducted in normal climatic conditions and at the upper value of relative humidity. The test object must be disconnected from external power networks and load; input (output) terminals must be connected between them or shunted. When testing power electronic apparatus (converting devices), the contacts of switching devices of power circuits must be closed or shunted.

де U_n , $U_{\text{випр}}$ – відповідно, номінальна та випробувальна напруга ізоляційного проміжку.

Результати вимірювань струмів витоку також дозволяють оцінити ступінь зволоження ізоляції. У даному випадку вона здійснюється зняттям характеристики $I_{\text{вит}} = f(U_{\text{пр}})$. Зволожена ізоляція має нелінійну характеристику, що пов'язано з інтенсифікацією іонізаційних процесів при великих величинах $U_{\text{пр}}$ і відповідно різким збільшенням $I_{\text{вит}}$.

Випробування на наявність видимої корони. Наявність або відсутність видимого коронного розряду є важливим показником стану зовнішньої ізоляції апарата. Випробування проводяться напругою промислової частоти, використовуючи аналогічну схему (див. рис. 3.7). Перевірка (випробування) на відсутність видимої корони проводиться у сухому стані у затемненому помешканні або в нічний час на відкритих площадках. Напруга на випробуваному об'єкті піднімають плавно до 110–120% напруги видимої корони, а потім знижують до нормованої випробної напруги. Наявність коронного розряду визначається візуально або фотографуванням.

Випробування ізоляції на стійкість щодо теплового пробою проводиться в тих випадках, коли він можливий. Наприклад, при використанні в якості основної волокнистої органічної ізоляції. Випробування проводиться подачею до ізоляції нормованої випробної напруги промислової частоти до сталого значення тангенса кута діелектричних втрат.

Випробування ізоляції низьковольтних апаратів та елементів. Відповідно до стандартів [8, 17, 32, 36, 37] та технічних умов на конкретні пристрої, основними вимогами до ізоляції електричних та електронних апаратів напругою до 1000 В, а також кіл керування, блокувань, сигналізації є, по-перше, вимога щодо її електричної міцності та, по-друге, вимога щодо її електричного опору. Отже основними видами випробувань у даному випадку є випробування електричної міцності ізоляції та вимірювання її опору.

Випробування електричної міцності проводять, як правило, у нормальних кліматичних умовах та при верхньому значенні відносної вологості. Випробуваний об'єкт повинен бути від'єднаний від зовнішніх живлячих мереж та навантаження; вхідні (вихідні) виводи повинні бути з'єднані між собою або зашунтовані. При випробуваннях силових електронних апаратів (перетворювальних пристроїв), контакти комутаційних апаратів силових кіл повинні бути замкнуті або зашунтовані.

The test is mainly carried out with a one-minute 2 kV applied power frequency voltage. During the tests, the following insulating gaps are verified: between the current-carrying and grounded parts (mainly the device casing); between current-carrying conductors of dissimilar circuits; the insulation between the open contacts of the switching devices of the same circuit is checked separately. If individual elements of the test object, in compliance with the standard or Specs, have a lower test voltage, then the tests are conducted with 1.5 kV test voltage.

It should be noted that in the event of breaking down insulation in testing process, semiconductor devices could undergo the action of high voltage. Therefore, to exclude the possibility of their fail, these components must be disconnected or shunted for a while the testing time. All contacts of the control systems should be shorted or grounded. The corresponding electrical circuits must be tested separately relatively the casing with the voltage as per Specs.

The device is considered to have passed the test if the insulation gaps was no broken-down or overlapped.

Resistance measurements of insulation are carried out at the same environmental conditions as withstand voltage test. Insulation resistance is measured between electrically decoupled circuits, as well as between electrical circuits and the casing. If the circuit component is connected to the case, it must be disconnected for a while the testing time.

The voltage of the measuring device must correspond to the nominal (amplitude) voltage of the circuit. The voltage can be higher when needed, but it should not exceed the test voltage.

The apparatus is considered to have passed the test if the resistance value measured is equal to or exceeds the standard value.

Випробування здійснюється переважно однохвилинною прикладеною напругою промислової частоти 2 кВ. При випробуваннях здійснюється перевірка ізоляції між струмоведучими і заземленими частинами (переважно корпусом апарата); між струмоведучими частинами різних кіл; окремо перевіряється ізоляція між розімкнутими контактами комутаційних апаратів одного кола. Якщо окремі елементи випробуваного об'єкту відповідно стандарту або технічних умов мають випробну напругу нижче, то випробування проводяться випробною напругою 1,5 кВ.

Слід зазначити, що у випадку пробою ізоляції в процесі випробувань напівпровідникові прилади, а також елементи систем керування можуть піддатись дії високої напруги. Отже, для усунення можливості виходу їх з ладу, ці елементи на час випробувань повинні бути відключені або зашунтовані. Всі контакти систем керування мають бути закорочені та заземлені. Відповідні електричні кола мають випробуватись окремо відносно корпусу напругою, що вказана в технічних умовах.

Апарат вважають таким, що витримав випробування, якщо не відбулося пробою або перекриття ізоляції.

Вимірювання опору ізоляції здійснюють при зовнішніх умовах, аналогічних випробуванням її електричної міцності. Опір ізоляції вимірюється між електрично нез'єднаними колами, а також електричними колами та корпусом. Якщо елемент схеми з'єднаний з корпусом, то він на час випробувань повинен бути від'єднаний.

Напруга вимірювального приладу повинна відповідати номінальній (амплітудній) напрузі кола. За необхідністю напруга може бути більш високою, але не перевищувати випробувальну.

Апарат вважають таким, що витримав випробування, якщо вимірне значення опору дорівнює або перевищує нормоване значення.

4. SWITCHING TESTS OF ELECTRICAL APPARATUS

This type of testing is typical for switching devices, such as circuit-breakers and fuses for high and low voltage applications, contactors, magnetic starters, control relays, load-break switches etc. The main purpose of the tests is to verify the so-called switching ability of the device.

Switching ability is an integral concept defining the property (ability) of switching device to ensure a certain number of switching (make, break, and cycle) operations in a power circuit at the given its parameters. The switching ability includes a number of individual (more specific) concepts (properties) defined by the purpose of the device and its operating conditions.

Firstly, there is the notion *breaking (making) capacity*, which is defined by the maximal value of the current that the device is able to break (to make). This concept is usually applied to characterize switching devices that perform protection functions, that is, executing breaking (making) the power circuit in the event of fault, namely, overload or short-circuit.

Secondly, there is also the notion *switching wear-resistance (electrical life)* that defines the permissible number of switching operations of the load current for specified parameters of the circuit to be switched. For switching devices designed for frequent switching operations, the electrical life is also determined for specified switching frequency. The concept of electrical life is most often applied to characterize switching devices that perform the functions of switching the load currents, i.e. make and break operations in normal circumstances.

There are also other concepts in respect to the switching capability of switching devices. Therefore, switching tests of electrical devices are very diverse; the purpose of the device and, accordingly, the features of its operating duty in executing make-break operations determine their content. The initial stage of conducting switching tests is the determination of the parameters of the test circuit and its adjustment.

4. КОМУТАЦІЙНІ ВИПРОБУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ

Даний вид випробувань є характерним для комутаційних апаратів: контакторів, магнітних пускачів, реле, вимикачів високої і низької напруги, запобіжників, вимикачів навантаження, роз'єднувачів і т.п. Основною метою випробувань є перевірка їх комутаційної спроможності.

Комутаційна спроможність – це комплексне поняття, яке визначає властивість (спроможність) апарата забезпечити виконання заданої кількості комутаційних операцій (увімкнень, вимкнень, комутаційних циклів) при заданих параметрах кола, що комутується. Комутаційна спроможність включає у себе ряд окремих (більш конкретних) понять (властивостей), які визначаються режимом експлуатації апарата.

По-перше, існує поняття *вимикальна (вмикальна) спроможність*, яке визначається максимальним значенням струму, який даний апарат спроможний вимкнути (увімкнути). Це поняття використовується частіш усього для характеристики апаратів, які здійснюють функції захисту, тобто апаратів, що забезпечують вимикання (увімкнення) електричного кола при виникненні ушкодження: перевантаження або короткого замикання.

По-друге, існує також поняття *комутаційна зносостійкість*, яке визначає допустиму кількість комутацій струму навантаження при заданих параметрах кола, що комутується. Для апаратів, які призначені для частих комутацій комутаційна зносостійкість визначається також при заданій частоті комутацій. Поняття комутаційної зносостійкості визначається частіш за усе для характеристики апаратів, які здійснюють функції комутації струму навантаження, тобто вмикання та вимикання електричного кола у нормальному експлуатаційному режимі.

Існують також інші поняття щодо комутаційної спроможності апаратів. Отже, комутаційні випробування електричних апаратів велими різноманітні; їх зміст визначається призначенням апарата та, відповідно, особливостями його експлуатаційного режиму щодо виконання комутаційних операцій. Початковим етапом проведення комутаційних випробувань є визначення параметрів випробного контуру та його налаштування.

4.1 Adjustment of the Test Circuit

The test circuit is the most important component of the test setup for performing switching tests. It is an artificially constructed electrical circuit, which, during the tests, must provide the required parameters of the current being switched, at a given power voltage, namely:

- rms (amplitude) value of the current;
- electromagnetic time-constant or electrical power factor;
- specified parameters of transient recovery voltage (TRV).

To perform switching tests in short circuit conditions, the test circuit must also to ensure:

- the peak value of the short-circuit current;
- specified value of DC (aperiodic) component;

The simplest variant of the test circuit to perform switching tests is shown in Figure 4.1.

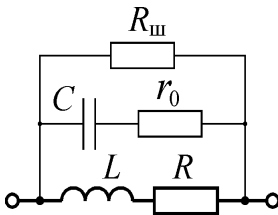


Figure 4.1 – Circuit diagram of single-phase test circuit

It contains the following basic components: reactor (inductive reactance) L ; resistor (pure resistance) R . Their values ensure required magnitude of the current being switched, as well as electromagnetic time-constant (electrical power factor) of the test circuit. In transient condition when AC circuit is interrupted, these values ensure the decay factor of the DC (aperiodic) current as well.

The test circuit also contains shunting elements: C is the capacitance; R_{sh} and r_0 are the resistors that ensure specified parameters of transient recovery voltage: frequency f_0 , peak factor κ_a , and the rate of rise. When testing low voltage devices, they are pre-calculated using the following formulas [17]:

$$R_{sh} = \frac{0,4 \cdot (4\pi^2 + m^2) \cdot f_0 \cdot L}{m}; \quad C = \frac{1,4}{4 \cdot (\pi^2 + m^2) \cdot f_0 \cdot L'}$$

$$\text{де } m = 2 \cdot \ln \frac{1}{\kappa_a - 1}.$$

The process of a test circuit adjustment is to determine and experimentally verify its parameters in respect to current to be switched and recovery voltage.

4.1 Налаштування випробного контуру

Випробний контур є найбільш важливим елементом випробної установки для проведення комутаційних випробувань. Випробний контур це штучно створене електричне коло, яке в процесі випробувань повинно забезпечити задані параметри струму, що комутується при заданій напрузі живлення, а саме:

- діюче (амплітудне) значення струму;
- електромагнітну постійну часу (коефіцієнт потужності).
- нормовані параметри поновлюваної напруги.

Для проведення комутаційних випробувань в режимі короткого замикання необхідно забезпечити також:

- ударне значення струму к.з.
- нормоване значення аперіодичної складової струму к.з.

Типова електрична схема однофазного випробного контуру для проведення комутаційних випробувань надана на рис. 4.1.

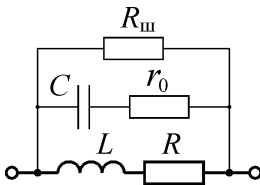


Рисунок 4.1 – Електрична схема однофазного випробного контуру

Схема містить реактор L та резистор R , які забезпечують задану величину комутуваного струму, а також електромагнітну постійну часу (коефіцієнт потужності) випробного контуру. У перехідному режимі при відмиканні кола змінного струму ці величини забезпечують також швидкість загасання аперіодичної складової струму. Випробний контур також містить шунтувальні елементи: C – ємність;

$R_{ш}$ і r_0 – резистори, що забезпечують задані параметри поновлюваної напруги: частоту f_0 , коефіцієнт амплітуди k_a , а також швидкість зростання. При випробуваннях апаратів низької напруги їх величини попередньо розраховуються за наступними формулами [17]:

$$R_{ш} = \frac{0,4 \cdot (4\pi^2 + m^2) \cdot f_0 \cdot L}{m} \quad C = \frac{1,4}{4 \cdot (\pi^2 + m^2) \cdot f_0 \cdot L'}$$

$$\text{де } m = 2 \cdot \ln \frac{1}{k_a - 1}.$$

Процес налаштування випробного контуру полягає у тому, щоб визначити та експериментально перевірити його параметри щодо комутуваного струму та поновлюваної напруги.

Adjustment of the parameters of switched current. As already noted, the main elements that determine the switched current parameters are the reactor L and the resistor R . If the reactor L has not ferrous core, its inductance is measured with the so-called inductance bridge known also as *Anderson* or *Maxwell Bridge*. However, for the purpose to reduce overall dimensions of test setups, extensive application have iron-cored reactors. The presence of the ferrous core introduces substantial dependence between its inductance and carried current. That is why the test circuit is mainly adjusted under near-testing conditions.

If the test is performed under near-rated conditions, the test circuit inductance is usually measured using ammeter-voltmeter method combined by connection of wattmeter or phasemeter with application of relevant transducers, when it is necessary. The accuracy of the measurements in this case is defined by certainty of instruments and transducers, as well as their power consumption. Pure resistance of the test circuit in this case is usually measured by ammeter-voltmeter method under DC current.

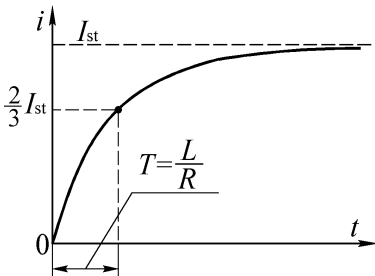


Figure 4.2 – Determining the test circuit inductance at DC current

When the tests are carried out in the short-circuit conditions, the basic method to measure the test circuit parameters (inductance, electromagnetic time constant, DC component and its decay rate) is recording the transient current. When the test circuit is energized by DC power supply U_c , the transient current trace follows to the exponential curve as shown in Figure 4.2:

$$i = \frac{U_c}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right). \quad (4.1)$$

The value of steady state current I_{st} and electromagnetic time-constant for the circuit T are measured directly from the transient current trace. The test circuit parameters are determined according to the following expressions:

$$L = T \cdot R; \quad R = \frac{U_c}{I_{st}}. \quad (4.2)$$

Налаштування параметрів комутованого струму. Як зазначалось, основними елементами, що визначають параметри комутованого струму є реактор L та резистор R . Якщо реактор не має феромагнітного сердечника, то вимірювання його індуктивності проводять *вимірювальними мостами змінного струму*. Проте, з метою зменшення габаритів випробних установок частіше використовуються реактори з феромагнітними сердечниками, наявність якого вносить істотну залежність його індуктивності від струму, що протікає в реакторі. Тому настроювання випробного контуру за звичаєм здійснюється в режимах, близьких до випробних.

Якщо випробування проводяться *в режимах, близьких до номінального*, то індуктивність за звичаєм визначається методом спільного включення амперметра, вольтметра і ватметра (фазометра) з використанням відповідних вимірювальних перетворювачів, якщо це необхідно. Точність вимірів у даному випадку визначається точністю вимірювальних приладів і вимірювальних перетворювачів, а також потужністю, що ними споживається. Активний опір випробного контуру вимірюється за звичаєм методом амперметра-вольтметра при постійному струмі

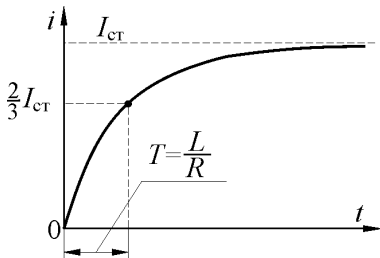


Рисунок 4.2 – Визначення індуктивності випробного контуру при постійному струмі

Якщо ж випробування проводяться *у режимі к.з.*, основним методом вимірювання параметрів випробного контуру (індуктивності, електромагнітної постійної часу, вмісту аперіодичної складової й швидкості її загасання) є осцилографування перехідного струму. Осцилограма перехідного струму при підключенні випробного контуру до джерела постійної напруги U_c надана на рис. 4.2, яка відповідає експоненціальному закону:

$$i = \frac{U_c}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right). \quad (4.1)$$

З осцилограми, здобутої експериментально, визначаються сталі значення струму $I_{ст}$ й електромагнітна постійна часу T . Параметри випробного контуру визначаються у відповідності з наступними виразами:

$$L = T \cdot R; \quad R = \frac{U_c}{I_{ст}}. \quad (4.2)$$

The frequent enough case is testing of high-speed switching devices with obvious limiting of the short-circuit current. In this case, the short-circuit current is interrupted significantly earlier than it reaches a steady-state value. In such cases, for the current time-changing according to equation (4.1), the inductance is determined from the following expression:

$$L = \frac{U_c}{\left(\frac{di}{dt}\right)_{t=0}}, \quad (4.3)$$

where $\left(\frac{di}{dt}\right)_{t=0}$ is the rate of rise of the current at zero-time moment, which is found graphically by a slope of the current curve at zero-time moment.

The pure resistance can be determined from equation (4.1) or by ammeter-voltmeter method.

When the tests are performed under AC current, the test circuit parameters are found also from transient current trace, but in this case, it is measured under AC voltage. Typical trace of transient current in the test circuit energized by ac power supply is shown in Figure 4.3.

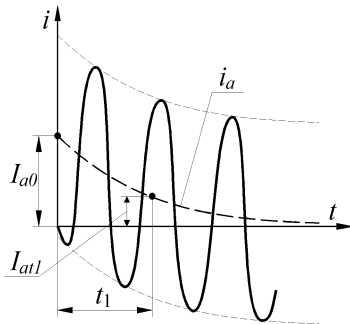


Figure 4.3 – Determining the test circuit inductance at AC current

The test circuit inductance is found from the DC component of the short-circuit current expressed by the following equation:

$$i_a = I_{a0} e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (4.4)$$

From this expression, the inductance of the test circuit can be found as follows:

$$L = \frac{t_1 R}{\ln \frac{I_{a0}}{I_{at_1}}}, \quad (4.5)$$

where I_{a0} and I_{at_1} are the values of the DC component at corresponding time instants derived from the short-circuit current trace (see Figure 4.3).

The pure resistance of the test circuit R can be measured under direct current (ammeter-voltmeter method, bridge method etc.).

У режимі к.з. досить часто випробуються апарати з вираженим ефектом струмообмеження (швидкодіючі запобіжники і вимикачі). При цьому струм к.з. переривається раніш, ніж він досягає сталого значення. У таких випадках для струму, що змінюється відповідно до рівняння (4.1), індуктивність визначається за наступним виразом:

$$L = \frac{U_c}{\left(\frac{di}{dt}\right)_{t=0}}, \quad (4.3)$$

де $\left(\frac{di}{dt}\right)_{t=0}$ – швидкість зростання струму у початковий момент часу, яка визначається графічно по дотичній проведеній з початкового моменту часу.

Активний опір контуру може бути визначений з рівняння (4.1) або методом амперметра-вольтметра.

Якщо випробування здійснюються *при змінному струмі*, параметри випробного контуру також визначаються за осцилограмою струму к.з., але при живленні від джерела змінного струму, яка надана на рис. 4.3.

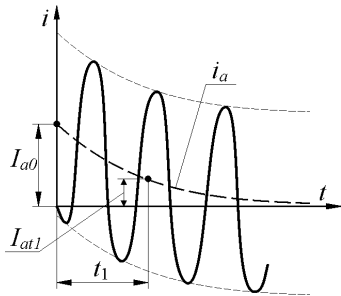


Рисунок 4.3 – Визначення індуктивності випробного контуру при змінному струмі

Індуктивність випробного контуру визначається за аперіодичною складовою струму к.з., яка відповідає наступному рівнянню:

$$i_a = I_{a0} e^{\frac{R}{L}t}. \quad (4.4)$$

Отже, індуктивність випробного контуру буде визначатись за наступним виразом:

$$L = \frac{t_1 R}{\ln \frac{I_{a0}}{I_{at_1}}}, \quad (4.5)$$

де I_{a0}, I_{at_1} – величини аперіодичної складової у відповідний момент часу, які визначаються з осцилограми струму к.з. (див. рис. 4.3).

Активний опір контуру R у цьому випадку може бути визначений шляхом безпосереднього виміру на постійному струмі (методом амперметра-вольтметра, мостовий метод і т.д.).

Adjustment of TRV parameters. The *transient recovery voltage* (TRV) is one of the important component characterizing the electric power circuit to be interrupted and essentially affects the circuit interruption process. As already noted, of practical importance is the so-called *system* or *inherent TRV* determined without taking into account the properties of the switching device, when the circuit is interrupted with the so-called *ideal switch*. The ideal switch opens at a current-zero crossing; its resistance is zero prior to current-zero crossing, and is infinite at once after current-zero. Actually, the ideal switch cannot be constructed. However, the properties of the switching device used for adjustment of TRV parameters of the test circuit must be in most degree closed to the properties of ideal switch. It is sufficiently difficult problem.

In the past, the parameters of TRV were specified with its average rate of rise and peak value. Currently, the TRV parameters for medium and high voltage devices are specified with the so-called *normalized limiting curves* also known as *reference lines*, as well as *delay lines*. Figure 4.4a shows a reference line, which is determined by two parameters and is specified for switching devices rated from 6 to 35 kV. Figure 4.4b shows a reference line 1, which is determined by four parameters and is specified for switching devices rated of 110 kV and above [28, 33].

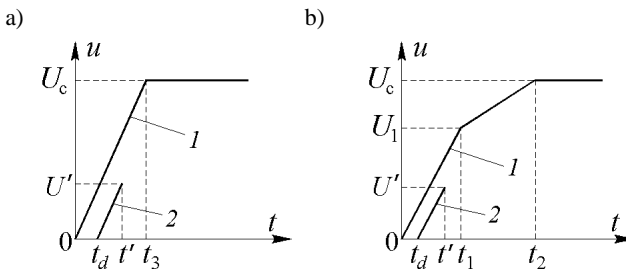


Figure 4.4 – Reference lines determined by two (a) and four (b) parameters

The TRV curve complies with the norm, if it lies below the limiting curve 1 and only once crosses the delay line 2. In order to provide a margin while testing medium and high voltage switching devices, the TRV curve is generated a little above the normalized curve.

For low voltage switching devices the TRV parameters are predetermined by a *free frequency* f_0 and *peak factor* κ_a evaluated by the empirical formulas [17]:

Налаштування параметрів ППН. *Перехідна поновлювана напруга* (ППН) є одним із найважливіших складових, що визначає властивості електричного кола і істотно впливає на процес його вимикання. Як зазначалося, практичний інтерес становить т.з. *власна ППН*, яка визначається без урахування властивостей комутаційного апарату, тобто виходячи з того, що коло вимикається т.з. *ідеальним вимикачем*. Його контакти розмикаються у момент переходу струму через нульове значення, його опір перед нульовим значенням струму дорівнює нулю, а відразу після нуля струму – безкінечності. Звичайно, що «ідеальний вимикач» не може бути створений в реальності, проте властивості вимикача, що застосовується для налаштування параметрів ПВН випробувального контуру, повинні бути максимально близькими до властивостей ідеального, що є досить серйозною проблемою.

У минулому, в якості нормованих параметрів ППН використовувалися середня швидкість зростання і пікове значення ПВН. У нинішній час параметри ППН для апаратів високої напруги регламентуються *нормованими обвідними кривими*, а також *лініями запізнення*. На рис. рис. 4.4а надана обвідна крива 1, яка визначається двома параметрами і використовується для апаратів з номінальною напругою від 6 до 35 кВ. На рис. рис. 4.4б надана обвідна крива 1, яка визначається чотирма параметрами і використовується для апаратів з номінальною напругою 110 кВ і вище [28, 33].

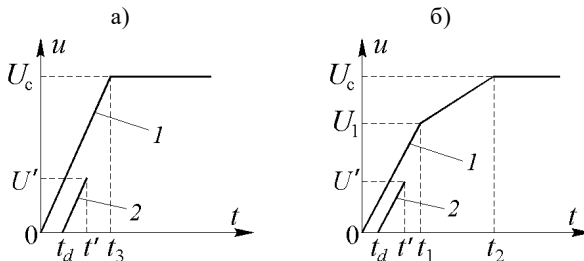


Рисунок 4.4 – Нормовані обвідні криві ППН, що визначаються двома (а) та чотирма (б) параметрами

Крива ППН буде відповідати нормі, якщо вона не виходить за межі обвідної кривої, і лише один раз перетинає лінію запізнення 2. Однак, при випробуваннях з метою забезпечення запасу, створюється крива ППН, що йде декілька вище обвідної кривої.

Для комутаційних апаратів низької напруги перехідна поновлювана напруга задається власною частотою f_0 і коефіцієнтом амплітуди k_a , які визначаються по емпіричних формулах [17]:

$$f_0 = A \cdot I_0^2 U_0^{-0,8} \pm 10 \text{ кГц.} \quad (4.6)$$

$$k_a = B + C \cdot \exp(-0,016 \cdot A \cdot I_0^2 U_0^{-0,8}) \pm 0,05 \quad (4.7)$$

where I_0 is the value of the current to be interrupted; U_0 is the *power frequency recovery voltage*; A, B, C are the constants: $A = 2600$; $B = 1,15$; $C = 0,5$ (for “heavy” switching conditions); $A = 2000$; $B = 1,1$; $C = 0,4$ (for “soft” switching conditions).

There are a number of measuring techniques to determine the TRV parameters. The most extensive application has received two methods. The first one is *insertion of rectifier into a line* realized by the circuit shown in Figure 4.5.

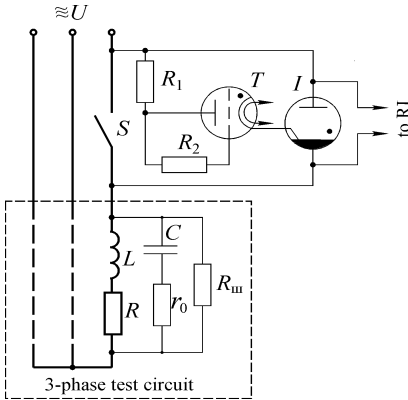


Figure 4.5 – Circuit for experimental determining TRV parameters

Ignitron I (its semiconductor analog is a thyristor) is connected across line break S . It, by the properties, are most close to ideal switch. Ignition of the ignitron is carried out by thyatron T . At the end of the conductive half-cycle the ignitron cuts off and the power voltage recovers across it. The process is periodically repetitive and if oscillograph is auto-triggered, the recovery voltage trace is steady displayed on the screen.

The application of semiconductor devices (diodes, thyristors) in this case is extremely undesirable, because these devices have insufficiently high resistance and very high capacitance in reverse direction that leads to considerable distortion the TRV curve.

The main advantages of this method is simple realization, and the fact that it does not require de-energize the circuit, i.e., practically does not fail normal operation of the electrical system. The main its disadvantage is the use of this method at HV is impossible, however it has extensive application in low-voltage test setups.

$$f_0 = A \cdot I_0^2 U_0^{-0,8} \pm 10 \text{ кГц.} \quad (4.6)$$

$$k_a = B + C \cdot \exp(-0,016 \cdot A \cdot I_0^2 U_0^{-0,8}) \pm 0,05 \quad (4.7)$$

де I_0 – величина струму, що вимикається; U_0 – поновлювана напруга промислової частоти; коефіцієнти: $A = 2600$; $B = 1,15$; $C = 0,5$ (для "жорстких" умов комутації); $A = 2000$; $B = 1,1$; $C = 0,4$ (для "м'яких" умов).

Існує декілька способів експериментального визначення параметрів ППН. Найбільш широке використання набули два методи. Перший метод полягає у підключенні випрямляча в розрив однієї з фаз, який реалізується схемою, що надана на рис. 4.5.

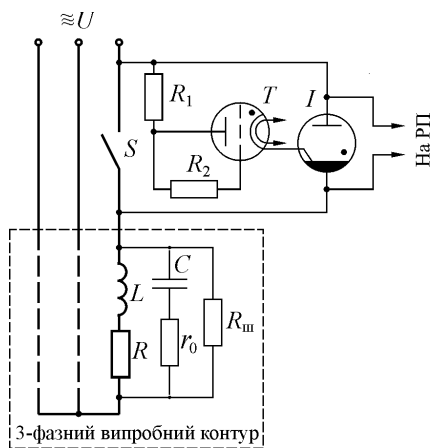


Рисунок 4.5 – Схема експериментального визначення параметрів ППН

У розрив однієї з фаз S включається ігнітрон I (його напівпровідниковим аналогом є тиристор), який за своїми властивостями близький до ідеального вимикача. Для його підпалювання використовується тиратрон T . Наприкінці напівперіоду провідності ігнітрон замикається і на ньому поновлюється напруга джерела. Процес періодично повторюється, і при відповідному налаштуванні, на екрані осцилографа утворюється стійке

зображення кривої поновлюваної напруги.

Використання напівпровідникових приладів (діодів, тиристорів) у даному випадку вкрай небажано, оскільки їх малий опір у запертому стані та достатньо велика ємність значно спотворюють криву ППН.

Основними перевагами даного методу є простота у реалізації, а також те, що не вимагає знеструмлення кола, тобто практично не порушує умов нормальної роботи електричної системи. Основним його недоліком є неможливість використання при високих напругах, але у випробних установках низької напруги цей метод набув широкого використання.

TRV parameters of the test circuits designed to test high-voltage switching devices are measured by another method named *half-waved current injection*. In this case, the test circuit is separated from the power source and is shorted out as shown Figure 4.6.

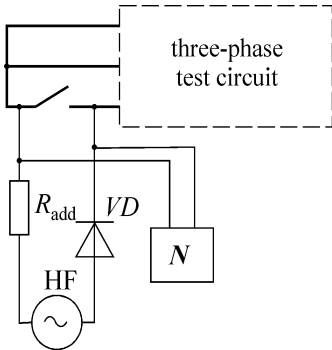


Figure 4.6 – Circuit to determine TRV parameters in HV systems

Unipolar half-waves of current with an amplitude of at least 1 A are injected into the test circuit from the high-frequency source HF. At the half-wave end the voltage recovery occurs. Recovery voltage trace is displayed by cathode-ray oscillograph N. The operational frequency f of the source is chosen according to the magnitude of the current being interrupted I_0 :

at $I_0 < 1000$ A, $f = 2$ kHz;

at $I_0 > 1000$ A, $f = 4$ kHz;

but it should not exceed 10 % of TRV natural frequency f_0 . As the rectifier

VD, kenotron is recommended for application.

The principal drawback of this method is that measurements are taken under low current conditions. Under short-circuit conditions, the TRV parameters can be somewhat distinctive due to eddy currents, change in the permeability, the proximity effect, and other factors. To mitigate the noted drawback, the TRV parameters are measured under the condition the derivatives of the currents at zero moment are the same:

$$I_0 \cdot f_0 = I'_0 \cdot f'_0, \quad (4.8)$$

where I_0, f_0 is, respectively, the current to be interrupted and its frequency at which the apparatus is tested; I'_0, f'_0 is, respectively, the current and operational frequency, at which the test circuit is adjusted.

It should be noted that there exist some other techniques for the experimental determination of the TRV parameters [44].

4.2 Power Supply Sources for Test Setups

Conducting switching tests of high- and low-voltage switching devices, in particular the ultimate switching capacity tests, necessitates generation of short-circuit currents at rated voltage. Such tests are performed in specially equipped *high power (HP) laboratories*.

При настроюванні коливальних контурів для комутаційних випробувань високовольтних вимикачів використовується інший метод. У даному випадку випробний контур відокремлюється від джерела живлення і закорочується, рис. 4.6.

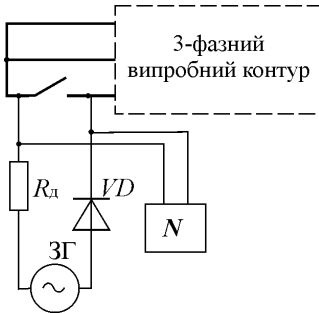


Рисунок 4.6 – Схема визначення параметрів ППН у високовольтних системах

перевищувати 10% від власної частоти f_0 . У якості випрямляча VD рекомендується використовувати кенотрон.

Основним недоліком розглянутого методу є те, що вимірювання здійснюються не в режимі к.з., при якому через вихрові струми, змінення магнітної проникності, ефекту близькості параметри ППН можуть бути декілька іншими. Для часткового усунення зазначеного недоліку визначення параметрів ППН здійснюється при дотриманні наступної умови:

$$I_0 \cdot f_0 = I'_0 \cdot f'_0 \quad (4.8)$$

де I_0, f_0 – відповідно струм, що вимикається, і частота ППН в реальних умовах; I'_0, f'_0 – відповідно струм, що вимикається, і частота ППН в умовах вимірювання.

Слід відзначити, що існують також інші методи експериментального визначення ППН [44].

4.2 Джерела живлення випробних установок

Комутаційні випробування апаратів високої та низької напруги, зокрема випробування на граничну комутаційну здатність, пов'язані з необхідністю створювати струми к.з. при номінальній напрузі. Такі випробування проводять у спеціально обладнаних *лабораторіях великої потужності*.

With an increase in the voltage ratings and short-circuit currents to be interrupted, tests become more and more problematic due to lack of sufficient power at the test facilities. For example, to perform full-scale (direct) testing a circuit breaker rated 750 kV and short-circuit current 63 kA, it is necessary to have supply source with the capacity:

$$S = \sqrt{3} \cdot 750 \cdot 63 = 81742 \text{ MVA}$$

Such powers can be generated only by powerful power systems. The construction of test setups for such high powers is economically impractical, because at first, this involves in great investments numbered in millions and even tens millions dollars and, secondly, switching devices (circuit-breakers) with high switching capacity are manufactured in very small quantities.

Table 4.1 shows testing capabilities of largest HP laboratories in the world.

Table 4.1 – Parameters of the most powerful HP Laboratories

Organization, name	Location	Short-circuit power, MVA	Synthetic circuit	
			Voltage, kV	Current, kA
KEMA–CESI , HP Laboratory	Arnhem, The Netherlands	12600	1200	100
KEMA–CESI , KEMA-Powertest	Chalfont, USA	3250		
ABB , HP Laboratory	Ludvika, Sweden	4000	550	80
EDF , Electrical Equipment Laboratory	Renardieres, France	6600	1000	-
НИИ BBA	Moscow, Russia	5000	400	63
CPRI , HP Laboratory	Bangalore, India	2500	245	63
LAPEM , HP Laboratory	Irapuato, Mexico	2200	-	-

Thus, even the largest laboratories have powers, which essentially less than those that required perform full-power (direct) testing. Therefore, there are two basic switching test methods, direct and indirect.

З підвищенням номінальних напруг і зростанням струмів к.з., що відключаються вимикачами, випробування стають все більш утрудненими через недостатню потужність джерел живлення. Наприклад, для проведення повноцінних (прямих) випробувань вимикача з номінальною напругою 750 кВ і номінальним струмом вимикання 63 кА необхідне джерело потужністю:

$$S = \sqrt{3} \cdot 750 \cdot 63 = 81742 \text{ МВА}$$

Такі потужності можуть бути створені лише у дуже потужних енергосистемах. Будівництво ж випробних установок на такі великі потужності економічно недоцільне. Це пов'язано, по-перше, з великими капітальними витратами, які при створенні лабораторій великої потужності обчислюються мільйонами і навіть десятками мільйонів доларів і, по-друге, вимикачі з великою комутаційною потужністю виробляються у дуже малих кількостях.

У таблиці 4.1 показано випробувальні можливості найбільших лабораторій великої потужності у світі.

Таблиця 4.1 – Параметри лабораторій великої потужності

Інституція, найменування	Місце розташування	Потужність короткого замикання, МВА	Синтетична схема	
			Напруга, кВ	Струм, кА
КЕМА–CESI, HP Laboratory	Анхем, Нідерланди	12600	1200	100
КЕМА–CESI, КЕМА-Powertest	Чалфонт, США	3250	–	–
АВВ, HP Laboratory	Людвика, Швеція	4000	550	80
EDF, Electrical Equip- ment Laboratory	Ренард'є, Франція	6600	1000	-
НДЦ ВВА	Москва, Росія	5000	400	63
CPRI, HP Laboratory	Бангалор, Індія	2500	245	63
LAPEM, HP Laboratory	Ірапуато Мексика	2200	-	-

Таким чином, потужності навіть найбільших лабораторій виявляються часто значно меншими, ніж потрібно для проведення повноцінних (прямих) випробувань. Отже, існує два основні різновиди комутаційних випробувань: прямі та непрямі.

Direct test method is used in the case when the laboratory power supply is sufficient to provide required switching power for the breaker. In this case, three-phase circuit-breaker is tested on a three phase circuit at full current and full voltage.

If the power of the source is not sufficient to perform direct test, the so-called *indirect test* is performed. There are several indirect test methods.

- *single-phase test*: in this case only one pole of the breaker undergoes to the test; nevertheless, the test is performed at full power to be switched by the breaker pole;

- *unit tests*: such tests are the variety of single-phase tests and are suitable for ultra-high-voltage breakers having a several identical interrupters in series on each pole; The test is performed at full rated short circuit current and at a voltage level that is equivalent to the ratio of the number of interrupters used in the pole assembly to the full rated voltage of the complete pole;

- *two-part test* that consists of two essentially independent tests; the first test is the one where the interrupter is tested at full rated voltage and at a reduced current; in the second test, the maximum current is applied at a reduced voltage;

- *synthetic test*: it is essentially a two-part test that is done all at once; the test is performed with application of the so-called *synthetic circuits* combining a moderate voltage source, which supplies the full primary short circuit current with a second, high voltage, low current, power source that injects a high frequency, high voltage pulse at a precise time near the natural current zero of the primary high current.

Among the indirect test methods, the most effective is the application of synthetic circuits. This method is currently the most widely used when conducting switching tests of high-voltage circuit-breakers. A typical structure of the synthetic circuit is shown in Figure 4.7.

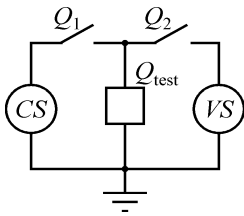


Figure 4.7 – Structure of synthetic circuit

Besides test circuit-breaker Q_{test} , this circuit contains a current source (CS), a voltage source (VS), as well as auxiliary switches Q_1 and Q_2 . The test is performed in the following order. At first the auxiliary switch Q_1 is closed, providing the application of a short-circuit current pulse of a given value from the current source to the test breaker.

Прямі випробування проводять у тому випадку, коли потужність джерела живлення лабораторії достатня для забезпечення необхідної комутованої потужності вимикача. У цьому випадку 3-полюсний вимикач випробується у 3-фазному режимі при напрузі, яка дорівнює номінальній напрузі вимикача, при струмі, який дорівнює його номінальному струму вимикання.

Якщо ж потужності джерела недостатньо для прямих випробувань, проводять *непрямі випробування*. Існує кілька методів проведення непрямих випробувань:

- *однофазні випробування*: у цьому випадку випробуванням піддається тільки 1 полюс вимикача, проте випробування проводяться при повній комутованій потужності полюса вимикача;

- *випробування окремого розриву*: такі випробування є різновидом однофазних випробувань для вимикачів ультрависокої напруги, що мають кілька послідовних розривів; у цьому випадку випробуванням піддається тільки один розрив при повній його комутованій потужності з урахуванням нерівномірного розподілу напруги по полюсу;

- *дворазові випробування*: у цьому випадку проводять два незалежних випробування: перше – при напрузі, що дорівнює номінальній напрузі вимикача і зниженому значенні струму, що вимикається; друге – при струмі, що дорівнює номінальному струму вимикання вимикача та зниженій напрузі;

- *синтетичні випробування*: це, по суті, дворазові випробування, які проводяться одночасно в одному досліді; вони проводяться шляхом використання т.з. *синтетичних схем*, які є сполученням джерела зниженої напруги, яке забезпечує повний струм к.з., та джерела високої напруги, яке підключається поблизу нульового значення струму к.з., рис. 4.7.

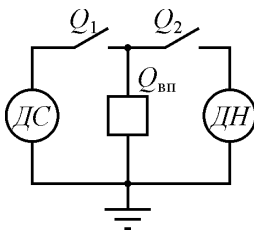


Рисунок 4.7 – Структура синтетичної схеми

Схема, окрім випробуваного вимикача $Q_{вп}$, містить джерело струму (ДС), джерело напруги (ДН), а також допоміжні вимикачі Q_1 та Q_2 . Випробування відбувається наступним чином. Спочатку вмикається допоміжний вимикач Q_1 , забезпечуючи подачу на випробуваний вимикач імпульсу струму к.з. заданої величини від джерела струму.

When the contacts of the test switch are opened, an electric arc discharge occurs, but the voltage drop across the contacts is relatively small. Therefore, the current source EMF is usually relatively small, but its value should be sufficient to maintain the burning of the arc between the contacts of the test breaker. When the arc current approaches zero, the auxiliary switch Q_1 is opened and separates the test breaker from the current source. At the same time, the auxiliary switch Q_2 closes, thereby providing the application of high recovery voltage of the specified parameters to the test breaker from the voltage source. Clearly, the operation of all the switches in the circuit must be synchronized, which is quite a grave problem.

If the arcing time in the test breaker according to the test conditions should be more than one half-cycle, the circuit should provide restoration of the short-circuit current in the next half-cycle. This principle of test construction enables us to realize test circuits for ultimate voltages and powers, because construction of distinctive current source and voltage source is not a significant problem.

The current source in synthetic circuits is usually specially designed impulse current generator most often called *short circuit generator*. Their main component is *energy storage device* that accumulates energy for the relatively long time and at the testing moment for a very short time gives up the energy as a current pulse. The most extensively used storage types are capacitive, inductive, mechanical, chemical, as well as their various combinations [41, 42, 44].

Capacitive storages: in this case, energy is accumulated by the capacitor banks as electric field energy. Accumulation of energy occurs when capacitor bank is charged from a low-power rectifier for a relatively long time, usually a several minutes. Then the capacitor bank is connected to the test object with the help of a switching device, usually an arrester, and is discharged during a very short time span.

Mechanical storages. One of their varieties, the so-called *impact-excited generators*, are most extensively used in HP laboratories. Impact-excited generator, usually called simply short-circuit generator is a modified three-phase turbine generator with a capacity of up to 300 MVA designed to give away high power for a very short time. In momentary duty, its power is an order of magnitude higher than under long-term operation. The energy accumulated by the generator has reached 10^9 kJ; the maximum currents are several hundred kiloamperes with a duration of 0.1–1 s.

При розмиканні контактів випробуваного вимикача виникає електродуговий розряд, але падіння напруги між контактами відносно невелике. Отже МРС джерела струму за звичаєм відносно невелика, але її величина повинна бути достатньою для підтримання горіння дуги між контактами випробуваного вимикача. При підході струму дуги до нульового значення вимикається допоміжний вимикач Q_1 і відокремлює випробуваний вимикач від джерела струму. Одночасно з цим, вмикається допоміжний вимикач Q_2 , забезпечуючи тим самим подачу на випробуваний вимикач високої поновлюваної напруги заданих параметрів від джерела напруги. Звичайно, що дія усіх вимикачів в схемі повинна бути синхронізована, що є досить серйозною проблемою.

Якщо час горіння дуги в $Q_{вп}$ за умовами випробувань повинен бути більше одного напівперіоду, в схемі повинно бути передбачене поновлення струму к.з. у наступний напівперіод. Такий принцип побудови випробувань дозволяє реалізувати випробні контури на граничні напруги і потужності, тому що створення окремих джерел струму і напруги не є значною проблемою.

Джерелом струму в синтетичних схемах за звичаєм є так званий *генератор імпульсного струму*. Його основним елементом є *накопичувач енергії*, який відносно тривалий час накопичує енергію, а в момент випробування за відносно короткий час віддає енергію у вигляді струмового імпульсу. Основними різновидами накопичувачів енергії, що використовуються у нинішній час в лабораторіях великої потужності є ємнісні, індуктивні, механічні, хімічні, а також різні їх сполучення [41, 42, 44].

Ємнісні накопичувачі: у даному випадку енергія накопичується конденсаторними батареями у вигляді енергії електростатичного поля у. Накопичення енергії відбувається в процесі заряду конденсаторів від малопотужного випрямляча впродовж відносно тривалого (декілька хвилин) проміжку часу. Потім конденсаторна батарея підключається до випробуваного вимикача через комутаційний пристрій (частіш за все розрядник) і розряджається впродовж дуже короткого проміжку часу.

Механічні накопичувачі. Найбільше поширення в лабораторіях великої потужності набув один з їх різновидів, т.з. *ударні генератори*. Ударний генератор або генератор ударного збудження являє собою модифікований трифазний турбогенератор з номінальною напругою, потужністю до 300 МВА, розрахований на віддачу великої енергії протягом короткого проміжку часу; у цей період його потужність на порядок перевищує номінальну. Енергія, що накопичує ударний генератор, досягає 10^9 кДж, максимальні струми (декілька сотень кілоампер) при тривалості 0,1–1 с.

To increase the capacity of the laboratory, the parallel operation of several generators is frequently used. The prime mover for impact-excited generator is usually an induction motor supplied from the network. It speeds up the generator under no-load operation and then is disconnected from the network at the test moment.

The main requirement imposed upon an impact-excited generator is minimal leakage reactance in order to simulate the maximum values of the short-circuit currents. This is achieved by a certain constructive techniques. First, as differentiated from general-purpose turbine generator, impact-excited generator has the reduced air-gap and the less number of turns of its stator winding. Secondly, the generator has the less deep and more width of the slots, thereby its rotor and stator windings are brought nearer to the air-gap. Finally, the rotor contains full damper winding, and the rotor winding ends are shielded. In order to reduce heavy mechanical loads to the foundation and case, the generator active part is fastened to the casing with an elastic element.

Inductive storages. In this case, the energy is accumulated by an inductive coil as magnetic field energy. It occurs by means of charging the coil by the current from DC supply source. Inductive storages is one of the most rational types of energy storage due to the simplicity of design, high reliability, good weight, size and energy performance, the possibility to apply uncontrollable low voltage primary power sources. The disadvantages of inductive storages devices include the presence of high-speed high-current switches in their circuits, great electrodynamic forces in the active zone, and complicated cooling systems. [42, 49].

The recovery voltage source in synthetic circuits is usually either a step-up transformer supplied from the current source of the synthetic circuit, or an oscillatory circuit adjusted to the TRV frequency. The auxiliary breakers in synthetic circuits are usually either the test breaker poles or controllable spark arresters.

It should be noted that HP labs are utilized not only for switching tests, but also for peak and short-time withstand current tests of switching and other electric apparatus (see subsection 5.2). Typical supply circuit of a HP lab equipped by a short-circuit generator is shown in Figure 4.8.

Для підвищення потужності лабораторії досить часто застосовується паралельне включення декількох ударних генераторів. Первинним двигуном для ударного генератора є за звичаєм асинхронний двигун, який розганяє його на холостому ході, і на момент проведення випробування, відключається від мережі.

Основною вимогою до ударного генератора є забезпечення мінімального реактивного опору розсіювання з метою одержання максимальних величин струмів короткого замикання. Це досягається конструктивними заходами: зменшена кількість витків обмотки статора, зменшена глибина і збільшена ширина паза статора, зменшений повітряний зазор та приближені до зазору обмотки статора та ротора, екрановані лобові частини і повна демпферна обмотка на роторі. Активна частина статора кріпиться до корпусу за допомогою еластичного елемента для зниження великих навантажень на фундамент і корпус при проведенні випробувань.

Індуктивні накопичувачі енергії: у цьому випадку відбувається накопичення енергії магнітного поля в процесі заряджання котушки індуктивності від джерела постійного струму. Індуктивні накопичувачі є одним з найбільш раціональних типів накопичувачів енергії завдяки простоті конструкції, високій надійності, добрим масогабаритним та енергетичним показникам, можливості використання нерегульованих первинних джерел живлення низької напруги. До недоліків індуктивного накопичувача слід віднести наявність у їх схемах швидкодіючих сильнострумівих комутаторів, великі електродинамічні зусилля в активній зоні, а також ускладнені системи охолодження [42, 49].

Джерелом поновлюваної напруги в синтетичних схемах слугує або підвищувальний трансформатор, що живиться від струмового кола самої синтетичної схеми, або коливальний контур, налаштований на частоту поновлюваної напруги. Допоміжними вимикачами у синтетичних схемах є за звичаєм полюси випробуваних вимикачів або керовані іскрові розрядники.

Слід зазначити, що в лабораторіях великої потужності проводить не тільки комутаційні випробування, але й випробування на стійкість апаратів (не тільки комутаційних) при протіканні наскрізних струмів короткого замикання (див підрозділ 5.2). Типова схема живлення лабораторії великої потужності, оснащеної генератором імпульсного струму (ударним генератором), надана на рис. 4.8.

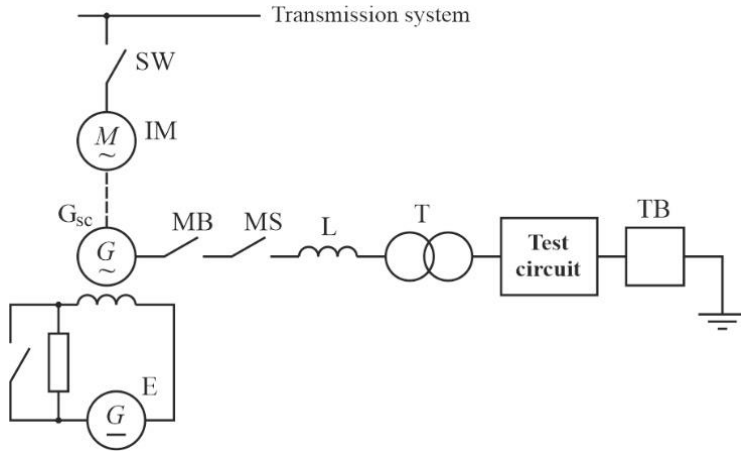


Figure 4.8 – One-line diagram of a testing station using a short-circuit generator

Power supply is applied via the source switch SW to the induction motor IM, which prior to the test speeds up the short-circuit generator G_{sc} to its synchronous speed during about 20 minutes. Hence, the power taken from the network is much lower than the power applied to the setup during the test. At the test moment, the short-circuit generator is excited from the exciter E, and then with the help of the make switch MS it is connected to the test setup containing the current-limiting reactor L, the short-circuit transformer T, the test circuit and the test breaker TB.

The test setup is supplied during the test due to the excitation and kinetic energy of the generator rotor mass. The master breaker MB serves to protect the test equipment against short circuit faults. Because the short-circuit generators are usually rated by 10–20 kV, to test circuit breakers for other ratings, specially designed adjustable *short-circuit transformers* are used.

Besides the laboratories equipped with short circuit generators, there are HP laboratories, where the current source is the *power network*. In this case the testing station is directly supplied from the network as shown in Figure 4.9.

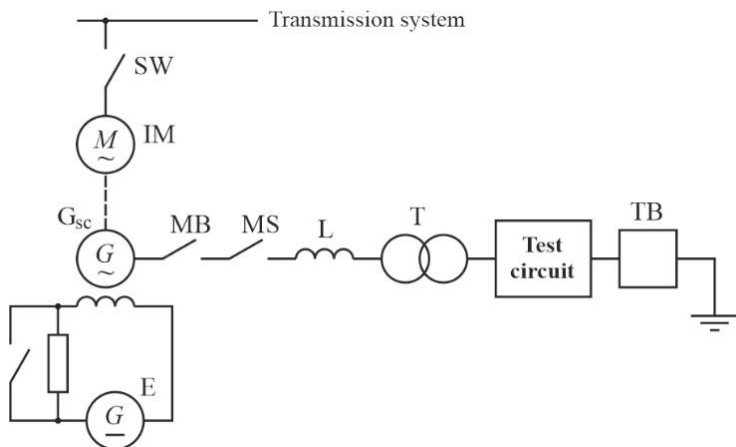


Рисунок 4.8 – Однолінійна схема випробної установки для комутаційних випробувань з використанням ударного генератора

Живлення від мережі через вимикач SW подається на асинхронний двигун IM , який перед проведенням випробування упродовж порядку 20 хвилин розганяє ударний генератор G_{sc} до його синхронної швидкості. Отже потужність, що споживається від мережі значно нижче потужності, що споживається під час випробування. В момент проведення випробування від збуджувача E на генератор подається збудження і за допомогою комутаційного апарата MS він підключається до схеми випробувань, яка містить струмообмежувальний реактор L , ударний трансформатор T , випробний контур та випробуваний вимикач TB .

Живлення схеми впродовж випробування здійснюється за рахунок енергії збудження та кінетичної енергії ротора ударного генератора. Ввідний вимикач MB слугує для захисту випробного обладнання від коротких замикань. Оскільки напруга на виході ударного генератора за звичаєм складає 10–20 кВ, для випробування вимикачів на інші класи напруги використовують т.з *ударні трансформатори* спеціальної конструкції з регулюванням напруги.

Поряд з лабораторіями, оснащеними генераторами імпульсних струмів, існують лабораторії великої потужності, де джерелом струму є *силова мережа*. У цьому випадку випробна установка підключається до мережі напругу, як показано на рис. 4.9.

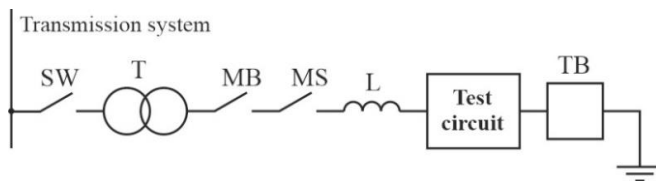


Figure 4.9 – One-line diagram of a testing station using a power network

The simplicity, as well as rather low financial investments and modest maintenance costs are the main advantages of HP laboratories supplied from the power network. Their main disadvantage is the probability of unstable operation of the network during tests, since the network in this case is used to directly supply short-circuit power. Therefore, the available network power must be at least ten times the power required for short-circuit testing, which often necessitates testing at night.

Along with laboratory testing, in some cases there is need to perform testing circuit breakers *in real power systems*. Such tests have certain advantages, such as the cost intensive test setups are not required, and the switching conditions are as close as possible to real ones. However, such tests have also the grave drawbacks. First, in order to provide the required power to be switched, it necessary to disconnect a certain part, and in some cases, all consumers, that is not always acceptable. Secondly, at the testing moment under short-circuit conditions, strong load steps, disturbing normal operation of the power system, can take place. Therefore, in a real power system, only some (e.g., certificate) testing are performed. However, when new engineering developments of arcing devices are performed, such tests are unsuitable because the number of experiments is great.

4.3 Testing of LV Apparatus

As it was noted, the switching tests are quite diverse and are defined by switching modes, which, in turn, are defined by the functional purpose of the device. From this standpoint, there are exist two main groups of switching devices for low-voltage applications that switch relatively high power: *control switchgear* and *distribution switchgear* or shortly *switchgear* and *controlgear*.

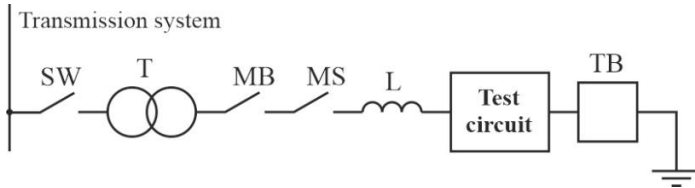


Рисунок 4.9 – Однолінійна схема випробної установки з використанням силової мережі

Основними перевагами лабораторій великої потужності з живленням від силової мережі є простота, а також низькі капіталовкладення та витрати на експлуатацію. Їх основним недоліком є вірогідність нестабільної роботи мережі під час випробувань, оскільки мережа у цьому випадку використовується для безпосередньої подачі потужності короткого замикання. Отже, доступна потужність мережі повинна, як мінімум, у десять разів перевищувати потужність, потрібну для випробування в режимі короткого замикання, що часто викликає необхідність проводити випробування у нічний час.

Поряд з лабораторними випробуваннями, у деяких випадках виникає необхідність проведення випробувань вимикачів на комутаційну спроможність в *реальних електричних системах*. Такі випробування мають певні переваги, оскільки не потребують дорогих випробних установок, до того ж умови комутації, максимально наближені до реальних. Недоліками таких випробувань є: по-перше, для створення необхідної комутаційної потужності необхідно відключати ряд споживачів, а найчастіше і всі споживачі, що не завжди є прийнятним; по-друге, у момент проведення дослідів к.з. виникають сильні поштовхи навантаження, що можуть порушити нормальну роботу електричної системи. Тому в реальній електричній системі можливі лише епізодичні (наприклад контрольні) випробування апаратів, при розробці ж нових конструкцій дугогасильних пристроїв такі випробування неможливі, оскільки число дослідів к.з. велике.

4.3 Випробування апаратів низької напруги

Як зазначалося, комутаційні випробування досить різноманітні і визначаються режимами комутації, які, своєю чергою, визначається функціональним призначенням апарату. З цих позицій розрізняють дві основні групи апаратів низької напруги, що комутують відносно великі потужності, це апарати керування та апарати розподільних пристроїв.

Control switchgear usually called *controlgear*, that is, switching devices for control applications, fulfill control by functioning of electric equipment (mostly electric motors). They are designed for frequent switching operations of load current and infrequent switching operations of overload currents (up to $10I_H$). This type of switching devices include *DC and AC contactors, magnetic starters, control relays* etc. These devices carry out switching operations of the currents typically in the range of 5 to 8000 A. As per valid standards [8, 17, 32], controlgear undergoes the following types of switching tests:

1. Infrequent make and break operations test: this test is purposed to verify making and breaking capability of the apparatus under overload current. The value of the current being switched is determined by the utilization category of the apparatus for the mode of infrequent switching operations.

During the test, 20 make and 25 break operations are conducted, excepting the devices for utilization categories AC-3 and AC-4, for which 100 make and 25 break operations are made. The time to stay the device in the on position is usually set in the range of 0.05 to 0.5 s; the intervals between make operations are in the range of 5 to 30 s, according to the value of the current being switched. The test outcome is considered as positive, if the following conditions are fulfilled:

- in the process of testing, there was no stable arcing or transition of the arc on the device dead parts and, accordingly, dielectric failures;
- after the test is completed, the device must be suitable for further operation in nominal conditions (after cleaning the contacts and arcing device).

2. Switching wear-resistance (electrical life) test: in this case, the total permissible number of switching operations of the switching device is verified under load currents. Its value is determined by the utilization category for the device for the mode of normal switching operations.

In the test process the frequency of switching operations must be correspond to permissible one for given device. The duration of staying of the device in close position must be at least 0.1 s. The number of switching operations is controlled by relevant counters. After every 10% of specified number of switching operations, the test device components are permitted for visual inspection and cleaning, as well as adjustment of contact pressure and follow-through, if the maintenance manual specifies this. Other corrections or substitutions of the elements during testing are not admitted.

Апарати керування здійснюють функції керування режимом роботи електроустаткування (переважно електродвигунів). Вони призначені для частих комутацій струму навантаження і нечастих комутацій струмів перевантаження (до $10I_n$). До них відносяться *контактори постійного і змінного струму*, у тому числі *магнітні пускачі, реле керування* та ін. Для даної групи апаратів, характерним є комутація струмів у межах від 5 до 8000 А. Відповідно до існуючих стандартів [8, 17, 32], комутаційні випробування апаратів керування здійснюються у наступних режимах:

1. Випробування в режимі рідкісних комутацій: у цьому режимі здійснюється перевірка спроможності апарата щодо вмикання та вимикання струму перевантаження. Величина комутуваного струму повинна відповідати категорії використання апарата, відповідно, для *режиму рідкісних комутацій*.

В процесі випробувань здійснюється 20 операцій вмикання та 25 операцій вимикання, окрім категорій використання АС-3 і АС-4, для яких здійснюється 100 операцій вмикання і 25 операцій вимикання. Час перебування у включеному положенні від 0,05 до 0,5 с; інтервали між операціями вмикання від 5 до 30 с в залежності від величини комутуваного струму. Результати випробувань у даному режимі вважають позитивними, якщо виконуються наступні умови:

- в процесі випробування не виникало стійкого горіння дуги або перекидання дуги на ті частини апарата, що не знаходяться під напругою та відповідно пошкодження ізоляції;

- після завершення випробувань апарат придатний для подальшої роботи у номінальних режимах (після чистки контактів та дугогасильних пристроїв).

2. Випробування на комутаційну зносостійкість: у даному режимі визначається загальна допустима кількість комутацій (комутаційний ресурс) апарата при струмах навантаження, величина якого повинна відповідати категорії використання для *режиму нормальних комутацій*.

В процесі випробувань частота комутацій повинна відповідати допустимій відповідно до стандартів і технічних умов на апарат. Час перебування у включеному положенні повинно бути не менше 0,1 с. Контроль кількості комутацій здійснюється відповідними лічильниками. Після кожних 10% від заданої кількості комутацій допускається огляд і чистка елементів випробуваного апарата, а також регулювання контактних натиснень і провалу контактів, якщо це передбачено інструкцією з експлуатації. Інших виправлень або заміни елементів при випробуваннях не допускається.

The apparatus is considered as withstood tests, if the following conditions are fulfilled:

- in the process of the test, any failures did not occur under make-break operations, such as welding of the contacts, pole-to-pole or pole-to-ground arcing, etc.;

- after the test apparatus has executed the specified number of the switching operations, the follow-through of the apparatus contacts comprises at least 1/5 of the minimum value of the initial one (i.e. prior to testing); in addition, the apparatus is suitable for further operation, and passed the temperature-rise test.

3. Critical breaking capability test: in this case, the device is verified in respect to its ability to break the so-called *critical currents*. The critical currents are usually in the range from 2 to 10% of the nominal operating current of the device and is characterized by longer arcing. Before the test, the presence of the zone of critical currents is first checked. During the test the arcing time is measured that, as noted, can be some longer than when interrupting the load or overload currents. The device is considered as passed the test, if it provided reliable interruption of the circuit.

In all discussed testing conditions, direct tests are performed, since the required power in these cases usually significantly less than those in available HP laboratories. Therefore, the tests of 3-pole devices are performed in 3-phase conditions according to the circuit shown in Figure 4.10.

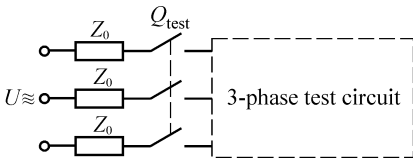


Figure 4.10 – Circuit for testing 3-pole control switchgear

Besides test apparatus Q_{test} , the circuit contains a three-phase test circuit and limiting element Z_0 intended to limit the current in the event of fault (short circuit). The test circuit is adjusted with taking into account its impedance.

Distribution switchgear

fulfills protective functions for electric equipment in low-voltage power systems. Their main purpose is, primarily, to de-energize the faulty subsystem in the event of overload or short-circuit. This type of switching devices includes safety devices (fuses) and automatic circuit-breakers. Automatic breakers fulfill also infrequent switching operations under load current. As per valid standards [8, 17, 32], the distribution switchgear undergo the following types of switching tests:

Апарат вважається таким, що витримав випробування, якщо виконуються наступні умови:

- в процесі випробувань не відбувалось відмов при вмиканні та вимиканні: приварювання контактів, перекидання дуги між полюсами або на заземлені частини і т.п.;

- після виконання заданої кількості комутацій провал контактів складає не менш $1/5$ від мінімального значення провалу до випробування; крім того, апарат придатний для подальшої роботи і витримав випробування на нагрів.

3. Випробування на вимикання критичних струмів: у даному випадку здійснюється перевірка спроможності апарата щодо вимикання т.з. *критичних струмів*. Зона критичних струмів лежить у межах від 2 до 10% від номінального робочого струму апарата і характеризується більш тривалим горінням дуги. Перед проведенням випробувань спочатку перевіряється наявність зони критичних струмів. В процесі випробувань здійснюється контроль часу горіння дуги, яке, як зазначалось, може бути дещо більше, ніж при вимиканні струмів навантаження і перевантаження. Апарат вважається таким, що витримав випробування, якщо він забезпечував надійне вимикання кола.

В усіх зазначених режимах проводяться прямі випробування, оскільки в усіх випадках потрібна комутаційна потужність значно менше, ніж наявна у лабораторіях великої потужності. Отже випробування триполюсних апаратів керування проводяться у трифазному режимі відповідно до схеми, яка надана на рис. 4.10.

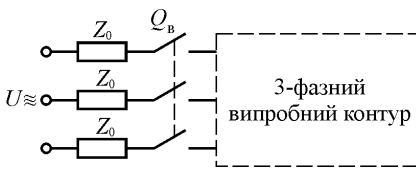


Рисунок 4.10 – Схема випробувань 3-полюсних апаратів керування

Окрім випробуваного апарата Q_B , схема містить 3-фазний випробний контур, а також опір Z_0 , призначений для обмеження струму короткого замикання. Випробний контур налаштовується з урахуванням його опору.

Апарати розподільних пристроїв здійснюють функції захисту електроустаткування у низьковольтних системах. Вони призначені, головним чином, для вимикання кіл при виникненні пошкоджень: перевантаження, коротке замикання. До даної групи комутаційних апаратів належать запобіжники та автоматичні вимикачі. Автоматичні вимикачі призначені також для виконання оперативних комутацій в електричних мережах, тобто нечастих комутацій струму навантаження. Відповідно до діючих стандартів [8, 17, 32], апарати розподільних пристроїв піддаються наступним випробуванням:

1. Switching wear-resistance (electrical life) test.

2. Critical breaking ability test.

3. Rated short-circuit current test. In this test, the apparatus is verified in respect to its ability reliable making (breaking) the short-circuit current, the parameters of which must correspond to the rated short-circuit current of the apparatus. The number of switching operations, as well as the interval between them, are established by standards for certain types of apparatus [17].

4. One-time switching capability test. In this test, the device must interrupt the current of a certain magnitude once, under the condition of safety for the service personnel and the equipment located nearby; in the process, the device may be so damaged that it cannot be repaired.

The first and second types of tests are performed in the same manner as the corresponding tests for controlgear using the same circuit (see Figure 4.10).

As for testing for the nominal and one-time switching capability of distribution switchgear, it should be noted that the power of available HP laboratories is usually sufficient to perform direct tests. Therefore, in short circuit conditions, the circuit shown in Figure 4.11 is usually used.

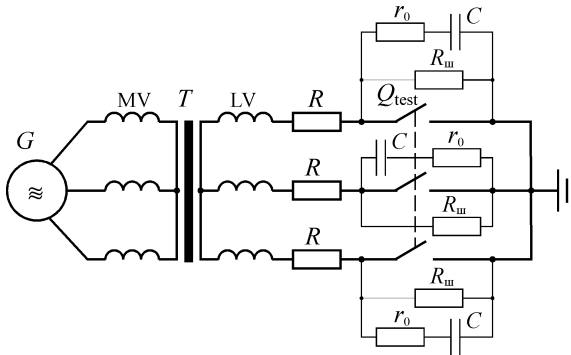


Figure 4.11 – The circuit for switching capability test of low-voltage distribution switchgear

The circuit is powered from the impact-excited generator G via a step down transformer T . The specified parameters of the short-circuit current are ensured by the aggregate impedance of generator, transformer and limiting resistor R . Shunting elements R_m , r_0 , and capacitor C provide the specified parameters of the recovery voltage.

1. Випробування на комутаційну зносостійкість.

2. Випробування на вимикання критичних струмів.

3. Випробування на номінальну комутаційну спроможність. У даному режимі здійснюється перевірка спроможності апарата щодо вмикання (вимикання) струму короткого замикання, параметри якого повинні відповідати номінальному струму вмикання (вимикання) апарата. Кількість операцій вмикання та вимикання, а також інтервал між ними встановлюються стандартами на певні види апаратів [17].

4. Випробування на одноразову граничну комутаційну спроможність. У даному режимі апарат має однократно вимкнути струм певної величини за умови безпеки для обслуговуючого персоналу та розташованого поблизу обладнання; при цьому апарат може бути настільки пошкоджений, що не допускає ремонту.

Перші два види випробувань здійснюються таким же чином, як і відповідні випробування апаратів керування, при цьому використовуються така ж схема випробувань (див. рис. 4.10).

Що стосується перевірки номінальної та одноразової граничної комутаційної спроможності апаратів розподільних пристроїв, то слід відзначити, що наявна потужність лабораторій великої потужності, як правило, достатня для проведення прямих випробувань. Отже, в цих випадках використовують схему, яка надана на рис. 4.11.

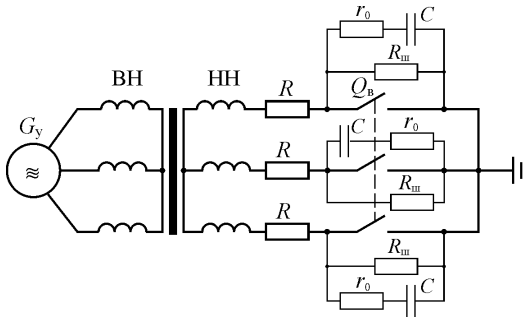


Рисунок 4.11 – Схема для перевірки комутаційної спроможності апаратів розподільних пристроїв низької напруги

Живлення схеми здійснюється від ударного генератора G_y через понижувальний трансформатор, опір яких повинен враховуватись при виборі параметрів випробного контуру. Зокрема, їх опори, а також опір обмежувального резистора R забезпечують задані параметри струму к.з. Шунтувальні елементи R_m , r_0 та C забезпечують задані параметри поновлюваної напруги.

4.4 Testing of HV Circuit Breakers: Test Content

High-voltage circuit breaker is the main switching device of power distribution systems in power stations and substations. Its reliable operation essentially ensure reliable power supply of industries and populated regions. The main duty of high-voltage circuit-breaker is to protect the main equipment, that is, it must ensure reliable de-energizing the faulty subsystem. Failure to perform this duty can result in serious damage to equipment, loss of stability, and even collapse of the system. Therefore, short-circuit testing is a very important tool for designing high-voltage circuit breakers. It is well known that in the process of interrupting high power, the breaker is subjected to extremely high mechanical, thermal and electrical stresses, which are difficult to take into account when performing engineering calculations. It should also be noted that high-voltage circuit-breakers perform switching operations in electric power circuits under other conditions, namely:

- make-break operations in normal circumstances (e.g., when the main electric equipment is put into service or removed from service to repair);
- making and breaking of unloaded power transmission lines and transformers (i.e., small capacitive and inductive currents) and others.

As per valid standards [8, 33], high-voltage circuit breakers undergo the following switching test types:

1. Interruption of currents comprising 10, 30, 60 and 100 % of the rated short-circuit current of the breaker with an unbalance factor of no more than 0.2. In the test process, at least six breaking operations are performed at each current magnitude.

2. Interruption of critical currents comprising 2...6 % of the rated short-circuit current of the breaker. As already noted, the arcing time significantly increases in the zone of critical currents. In the test process, at least six break operations are performed as well.

3. Make operation of the current equal to the rated short-circuit current of the breaker. In the test process, at least two make operations are performed.

4. Execution of rated switching sequences under rated short-circuit current. For the breakers designed for autoreclosing operations, these sequences are as follows:

sequence 1 is *O-t_a-CO-180 s-CO*;

sequence 1a is *O-t_a-CO-20 s-CO*.

4.4 Випробування вимикачів високої напруги: зміст випробувань

Вимикачі високої напруги є основними комутаційними апаратами розподільних пристроїв, їх надійна робота багато в чому визначає надійність електропостачання. Основною функцією високовольтних вимикачів є захист основного електроустаткування від перевантажень та коротких замикань: вони повинні забезпечити надійне вимкнення пошкодженої ділянки. Відмова при виконанні цієї функції веде до пошкодження обладнання, втрати стійкості та навіть руйнуванню системи. Отже випробування в режимі короткого замикання є дуже важливим інструментом проєктування високовольтних вимикачів. Добре відомо, що в процесі вимикання великої потужності вимикач піддається дуже високим механічним, термічним та електричним навантаженням, які важко врахувати при виконанні інженерних розрахунків. Слід також зазначити, що високовольтні вимикачі здійснюють функції комутації електричних кіл в інших режимах, а саме:

- вмикання та вимикання у номінальних режимах (при введенні основного електроустаткування до експлуатації або виведенні його у ремонт);

- вмикання та вимикання ненавантажених повітряних ліній та трансформаторів (малих ємнісних та індуктивних струмів); причому, як показав досвід експлуатації, в цьому випадку для вимикачів складаються досить важкі умови комутації.

Відповідно до чинних стандартів [8, 33] високовольтні вимикачі піддаються наступним видам комутаційних випробувань:

1) Вимикання струмів, що складають 10, 30, 60 і 100% номінального струму вимикання вимикача при коефіцієнті асиметрії не більш 0,2. В процесі випробування при кожному значенні струму проводиться не менше шести вимкнень.

2) Вимикання критичних струмів, що складають приблизно від 2 до 6% номінального струму вимикання вимикача. Як вже зазначалось, у зоні критичних струмів значно зростає тривалість горіння дуги. В процесі випробувань проводиться не менше шести вимкнень.

3) Вмикання струму, який дорівнює номінальному струму вмикання вимикача. В процесі випробувань проводиться не менше двох увімкнень.

4) Виконання нормованих комутаційних циклів при номінальному струмі вимикання і номінальному струмі вмикання. Для вимикачів, що допускають автоматичне повторне вмикання (АПВ) такими циклами є наступні:

- цикл 1: $O-t_{\delta/n}-BO-180\text{ c}-BO$;

- цикл 1a: $O-t_{\delta/n}-BO-20\text{ c}-BO$.

For the breakers that are not intended for autoreclosing operations, the sequence 2 is used: **O-180 s-CO-180 s-CO**,

where **O** is the operation of interrupting; **CO** is the reclosing on an available short-circuit followed by the immediate (with no time delay) interruption; t_a is the specified dead time for the breakers (usually in the range of 0.3 to 1.2 s according to the breaker type); **180 s (20 s)** is the time span in seconds.

5. Interruption of current comprising 60, 75 and 90% of the rated short-circuit current under short-line fault conditions; and 25% of the rated short-circuit current under out-of-phase switching.

6. Make-break operations for no loaded power transmission lines and power transformers.

All types of switching tests are performed under rated (operating) voltage. The TRV parameters of the test circuit should comply with specified values (see subsection 4.1).

As already noted, switching tests of HV circuit-breakers in short-circuit conditions are performed by two methods direct and indirect. Direct tests are usually performed according to the circuit shown in Figure 4.11. However, unlike this circuit, in given case the test circuit should be powered via stepping up transformer. Indirect tests, including synthetic tests, are usually performed for the most part with application of specially designed circuits containing energy storages.

4.5 Synthetic Testing of HV Circuit Breakers

The main problem facing the construction of electric circuits to conduct synthetic tests is to support their *equivalence*. This means that the synthetic circuit should reproduce the switching conditions that are as close as possible to those taking place when the breaker operates in real power network. It is generally agreed that most close to actual operational conditions are simulated in HP labs where the current source in the circuit is impact-excited generator. However, taking into account their high cost and investments for such test setups, the so-called *oscillation circuits* (i.e., capacitive storage) have received extensive application as current source, especially at moderate powers to be switched.

Для вимикачів, не призначених для роботи в режимі АПВ, таким циклом є цикл 2: **O–180с–BO–180 с–BO**, де **O** – операція вимикання; **BO** – операція вмикання на існуюче коротке замикання і негайного (без витримки часу) вимикання; $t_{0/n}$ – безструмова пауза, що гарантується для вимикачів (при АПВ складає 0,3–1,2 с в залежності від типу вимикача); **180 с (20 с)** – проміжок часу в секундах.

5) Вимикання струмів 60, 75 і 90% від номінального струму вимикання в умовах невіддаленого к.з.; а також 25% від номінального струму вимикання в умовах неузгодженості фаз.

б) Вимикання і вмикання ненавантажених ліній і силових трансформаторів.

Всі види комутаційних випробувань проводяться при номінальній (найбільшій робочій) напрузі. Параметри ППН випробного контуру повинні відповідати нормованим (див. підрозділ 4.1).

Як вже зазначалося, комутаційні випробування високовольтних вимикачів в режимі короткого замикання здійснюються двома методами: прямим і непрямим. Прямі випробування зазвичай виконуються за схемою, показаною рис. 4.11. Проте, у цьому випадку живлення випробувального контуру повинно здійснюватися через підвищувальний трансформатор. Непрямі, зокрема синтетичні випробування, зазвичай проводяться з застосуванням синтетичних схем, що містять накопичувачі енергії.

4.5 Синтетичні випробування високовольтних вимикачів

Основною задачею, що стоїть при побудові електричних схем для проведення синтетичних випробувань, є забезпечення їх *еквівалентності*. Це означає, що синтетична схема має відтворити умови комутації, які максимально наближені до реальних умов роботи апарата в мережі. Загально визнано, що найбільш близькі умови до реальної мережі створюються в лабораторіях великої потужності, де джерелом живлення є ударний генератор. Однак, з огляду на високу їх вартість і капітальні витрати, досить часто, особливо при відносно невеликих потужностях комутації, джерелом струму синтетичної схеми є *коливальний контур*, тобто використовується ємнісний накопичувач.

For the first time, the idea to test circuit breakers with application of an oscillation circuit was offered in 1937 by Professor A.A. Gorev. His project had been developed by the Leningrad Polytechnic Institute, and then had been practically realized in All-Union Electro-Technical Institute in 1950. Now this idea has gained extensive application. The test setups for switching tests with application of oscillation circuits has been designed and are operated in many countries [41, 42].

There is a major variety of circuit designs with an oscillation circuit; they may be united in two groups, namely, single-frequency circuits, in which the current subcircuit and a recovery voltage subcircuit are integrated, and double-frequency circuits, in which they are separated.

Single-frequency oscillation circuit. It is mainly used for single-phase and unit tests of the breakers with medium voltage ratings. It can be used also in two part and synthetic tests as the current source only. Simplest circuit for testing high-voltage circuit-breaker with application of single-frequency oscillation circuit is shown in Figure 4.12.

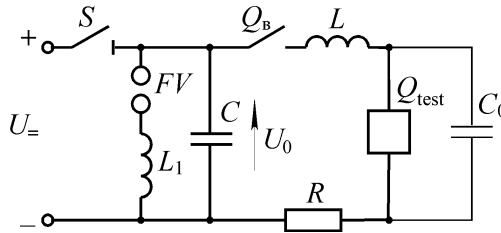


Figure 4.12 – Single-frequency oscillation circuit

Prior to the test the capacitor bank C is pre-charged up to amplitude value of power frequency recovery voltage U_0 from a low-power rectifying installation for a relatively long time (usually a few minutes). Then, the capacitor bank is disconnected from the charge subcircuit with disconnecter S . In order to ensure specified parameters of TRV the capacitor bank C_0 is connected in parallel to the test breaker Q_{test} . It should be noted that the same result is attained in the case the capacitor bank C_0 to connect in parallel to the reactor L . That is more, such manner to ensure the specified TRV parameters has a number of advantages, compared with the circuit in Figure 4.12, and its application is more suitable [41].

Вперше ідея використання коливального контуру для випробування високовольтних вимикачів була запропонована в 1937 р. професором А.А. Горєвим, яка у 1950 р. була практично здійснена у Всесоюзному електротехнічному інституті за проектом, розробленим у Ленінградському політехнічному інституті. У нинішній час ця ідея набула широкого розповсюдження; у багатьох країнах створені й експлуатуються випробні установки з коливальними контурами у синтетичних схемах [41, 42].

Існує велика різноманітність випробних схем з коливальним контуром, усі їх можна об'єднати у дві групи: одночастотні, де струмове коло і коло поновлюваної напруги об'єднані, і двочастотні – з розділеними колами.

Одночастотний коливальний контур використовується, головним чином, для однофазних та блокових випробувань вимикачів з відносно невеликою номінальною напругою. Він також використовується при дворазових та синтетичних випробуваннях тільки в якості джерела струму. Найпростіша схема випробувань вимикачів з використанням одночастотного коливального контуру надана на рис.4.12.

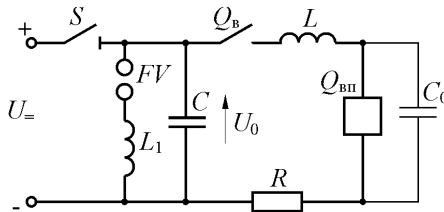


Рисунок 4.12 – Схема одночастотного коливального контуру.

Для проведення випробування конденсаторна батарея C попередньо заряджається до амплітудного значення поновлюваної напруги промислової частоти вимикача U_0 від малопотужної випрямної установки протягом відносно тривалого проміжку часу (за звичаєм декілька хвилин), після чого вона за допомогою роз'єднувача S відокремлюється від зарядної схеми. Для забезпечення потрібних (нормованих) параметрів ППН паралельно до випробуваного вимикача $Q_{ВП}$ підключається конденсаторна батарея C_0 . Слід зазначити, що аналогічний результат буде досягнуто, якщо конденсаторна батарея C_0 буде підключена паралельно до реактора L ; причому, такий спосіб забезпечення нормованих параметрів ППН має ряд переваг у порівнянні зі схемою рис. 4.12 [41].

In testing, the circuit operates as follows. With the help of making switch Q_B , the capacitor bank C is connected to the test breaker Q_{test} via the reactor L . At this instant, the slowly decaying sine current starts to flow in the circuit as it is shown in Figure 4.13:

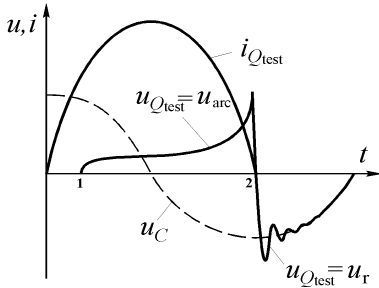


Figure 4.13 – Time diagrams of the current and voltages in testing

$$i = I_m e^{-\frac{R}{L}t} \sin \omega t, \quad (4.9)$$

where R is the pure resistance of oscillation circuit elements; I_m is the current amplitude in the circuit that must correspond to the testing conditions and is determined as follows:

$$I_m = \frac{U_0}{\omega L}. \quad (4.10)$$

Taking into account that the value of R is insignificant, the current frequency in the oscillatory circuit will be expressed as follows:

$$\omega = 2\pi f = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (4.11)$$

The parameters of the oscillation circuit are selected so that the frequency f would be equal to the power frequency (50 or 60 Hz),

At the instant 1 (see Figure 4.10), the contacts of the test breaker starts to open followed by arc ignition, but the current i continues to flow through the circuit. At the instant 2, when the current reaches its zero value, the arc extinguishes and voltage across Q_{test} starts to recovery until its steady state value U_0 according to the following equation:

$$u_r = U_0 \frac{C}{C + C_0} (1 - \cos \omega_0 t), \quad (4.12)$$

where ω_0 is the frequency of TRV expressed as follows:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_0}}. \quad (4.13)$$

При випробуваннях схема працює наступним чином. За допомогою вмикача Q_B конденсаторна батарея підключається до випробуваного вмикача $Q_{вп}$ через реактор L . При цьому через випробуваний вмикач починає проходити повільно загасаючий синусоїдальний струм, як показано на рис 4.13:

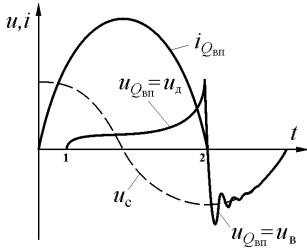


Рисунок 4.13 – Осцилограми струму і напруг при випробуваннях

$$i = I_m e^{-\frac{R}{L}t} \sin \omega t, \quad (4.9)$$

де R – активний опір елементів коливального контуру; I_m – амплітудне значення струму у колі, яке повинно відповідати умовам випробувань і визначається наступним чином:

$$I_m = \frac{U_0}{\omega L}. \quad (4.10)$$

З огляду на те, що величина R невелика, частота струму в коливальному контурі визначаються наступним чином:

$$\omega = 2\pi f = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (4.11)$$

Параметри коливального контуру вибираються таким чином, щоб частота f дорівнювала промисловій частоті (50 або 60 Гц).

У момент часу 1 (див. рис. 4.10) починають розмикатись контакти випробуваного вмикача $Q_{вп}$, отже між контактами виникає електродуговий розряд. При переході струму через нульове значення (момент часу 2) дуга згасає і на його контактах починає поновлюватись напруга відповідно до наступного виразу:

$$u_{п} = U_0 \frac{C}{C + C_0} (1 - \cos \omega_0 t), \quad (4.12)$$

де ω_0 – кутова частота ППН, яка визначається наступним виразом:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_0}}. \quad (4.13)$$

At the current-zero moment, spark gap FV is triggered and capacitor bank C is connected to the reactor L_1 with inductance equal to the inductance of the reactor L . It results in the TRV curve will contain two components: power frequency and high frequency (of the test circuit natural oscillations) ones, thereby approaching the waveform to real single-frequency TRV curve (see Figure 4.11).

Thus, the testing conditions for the breaker in the oscillation circuit in all stages are practically identical to operating conditions of the interruption in the network. It is confirmed by comparative transient analysis in the oscillation circuit and in the circuit fed from impact-excited generator [41].

As already noted, at high powers to be switched, the tests are performed with application of two power sources of moderate capacity (see Figure 4.8), that is, a two-frequency circuit is used. As an example, let us consider the most extensively used synthetic circuits with series and parallel current injection.

Series current injection method. This method is realized by the so-called *series current injection circuit* that also known as *USSR circuit*, which is represented in Figure 4.14.

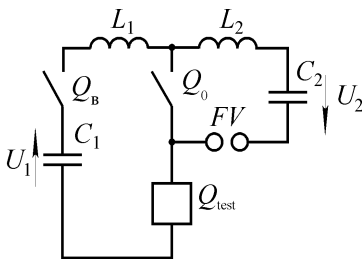


Figure 4.14 – Series current injection circuit

The power frequency oscillation circuit C_1-L_1 of reduced voltage U_1 serves as the current source while the increased frequency oscillation circuit C_2-L_2 of high voltage U_2 serves as the recovery voltage source. Charging subcircuits of the capacitor banks, as well as elements ensuring specific parameters of the TRV are not shown in the circuit. The

parameters of the oscillation circuit C_1-L_1 are selected so that the current value would be correspond to testing conditions, and its frequency would be adequate to the network frequency 50 or 60 Hz (see expressions 4.9 and 4.10). Capacitor banks C_1 and C_2 are pre-charged by the voltage U_1 and U_2 , respectively. The sum of charging voltages of the capacitor banks should correspond to required peak value of the power frequency recovery voltage: $U_0 = U_1 + U_2$.

В момент переходу струму через нульове значення спрацьовує розрядник FV і паралельно батареї C підключається реактор L_1 , індуктивність якого дорівнює індуктивності реактора L , у результаті чого крива ППН буде мати дві складові: складову промислової частоти і складову високої частоти власних коливань випробовного контуру, наближаючись до форми одночастотної кривої поновлюваної напруги (див. рис. 4.11).

Таким чином, умови випробувань вимикача у коливальному контурі в усіх фазах практично збігаються з умовами роботи вимикача в мережі в процесі вимикання. Це підтверджується аналізом перехідних процесів у коливальному контурі й у схемі з живленням від ударного генератора [41].

Як зазначалось вище, при великих потужностях випробування проводяться з застосуванням двох джерел відносно невеликої потужності (див. рис. 4.8), тобто використовується двохчастотний контур. Як приклад, розглянемо найбільш поширені синтетичні схеми з послідовним та паралельним накладенням струму.

Схема з послідовним накладенням струму надана на рис. 4.14. Джерелом струму в схемі є коливальний контур промислової частоти C_1-L_1 зниженої напруги; джерелом високої поновлюваної напруги є коливальний контур C_2-L_2 . В схемі не показані зарядні контури конденсаторних батарей C_1 і C_2 , а також елементи, які забезпечують потрібні (нормовані) параметри ППН.

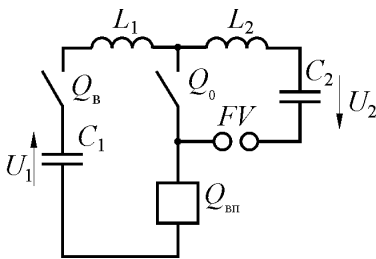


Рисунок 4.14 – Схема з послідовним накладенням струму

Параметри джерела струму вибираються виходячи з того, щоб величина струму відповідала умовам випробування, а його частота відповідала промисловій частоті 50 або 60 Гц (див. вирази 4.9 та 4.10). Конденсаторні батареї C_1 і C_2 попередньо заряджаються відповідно до напруг U_1 та U_2 . Їх сума повинна відповідати потрібному амплітудному значенню поновлюваної напруги промислової частоти $U_0 = U_1 + U_2$.

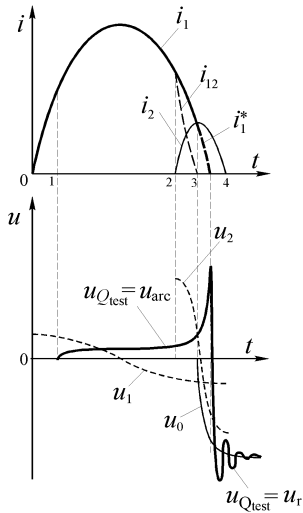


Figure 4.15 – Time diagrams of the currents and voltages for series current injection circuit

Initially, the test breaker and auxiliary switch Q_o are in close position, the make switch Q_B is in open position. In the test process, the circuit operates as follows. At first, the making device contacts are closed and slowly decaying sine current i_1 starts to flow through the current subcircuit $C_1-L_1-Q_o-Q_{test}$ (i.e., in same manner as in foregoing single-frequency oscillation circuit) that shown in Figure 4.15 (see expression 4.8). After sometime, at instant 1 (see the Figure 4.15), the contacts of the test breaker and interrupting device Q_o are opened, however the current i_1 continues to flow through their arc gaps.

At instant 2 the spark gap FV is triggered and the current of increased frequency i_2 is started to flow through the subcircuit $C_2-L_2-Q_o$. In the process, the total current through Q_o will be determined by the difference: $i_{12} = i_1 - i_2$

At instant 3, the current i_{12} reaches its zero value. If at this moment, the arc extinguishes in Q_o , then the current and voltage subcircuits form one oscillation circuit having capacitance:

$$C_0 = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}, \quad (4.14)$$

and inductance:

$$L_0 = L_1 + L_2. \quad (4.15)$$

A current i_1^* flows through the circuit formed; its slope in the near-zero zone must have the same value as for currents i_1 and i_2 . Therefore, the inductances of the subcircuits are decided from the following condition:

$$\frac{U_1}{L_1} \approx \frac{U_2}{L_2}. \quad (4.16)$$

If at zero crossing of the current i_1^* (instant 4) the arc extinguishes in Q_{test} , then the voltage across its contacts will recover until steady-state value U_0 with the frequency:

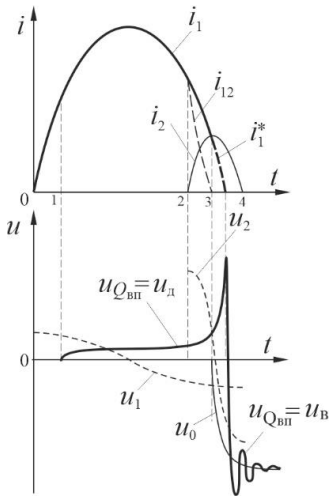


Рисунок 4.15 – Осцилограми струмів та напруг для схеми з послідовним накладенням струму

У початковому положенні контакти випробуваного вимикача і допоміжного вимикача Q_0 замкнуті, вимикача Q_B – розімкнуті. При проведенні випробувань спочатку замикаються контакти Q_B і в контурі струму $C_1-L_1-Q_0-Q_{test}$ починає текти повільно затухаючий синусоїдальний струм промислової частоти i_1 , рис. 4.15 (див. вираз 4.8). В момент часу 1 розмикаються контакти випробуваного вимикача і вимикального пристрою Q_0 , але через обидва дугові проміжки продовжує текти струм i_1 .

В момент часу 2 спрацьовує розрядник FV і в контурі $C_2-L_2-Q_0$ починає проходити струм підвищеної частоти i_2 . При цьому через Q_0 проходить струм:

$$i_{12} = i_1 - i_2.$$

В момент часу 3 струм i_{12} , що тече в Q_0 проходить через нульове значення. Якщо в цей момент дуга в Q_0 згасне, то контур струму і контур напруги утворюють один послідовний коливальний контур з ємністю:

$$C_0 = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}, \quad (4.14)$$

і індуктивністю:

$$L_0 = L_1 + L_2. \quad (4.15)$$

В утвореному контурі проходить струм i_1^* , швидкість зміни якого при підході до нуля має те ж значення, що і для струмів i_1 і i_2 , тому індуктивності контурів вибирають виходячи з наступної умови:

$$\frac{U_1}{L_1} \approx \frac{U_2}{L_2}. \quad (4.16)$$

Якщо при переході струму i_1^* через нуль (момент 4) дуга у $Q_{вп}$ згасне, то на його контактах буде поновлюватись напруга до сталого значення U_0 з частотою:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}}. \quad (4.17)$$

Parallel current injection method. In 1942, F. Weil introduced a synthetic test circuit, which was later improved by G. Dobke and others and is now used worldwide, as the parallel current-injection circuit often referred to as the *Weil-Dobke test circuit*. This method has received very extensive application, especially for testing the circuit-breakers with ultra-high switching capability. In this case, construction of the synthetic circuit at combined operation of short-circuit generator and oscillation circuit is economically suitable. This circuit is represented in Figure 4.16.

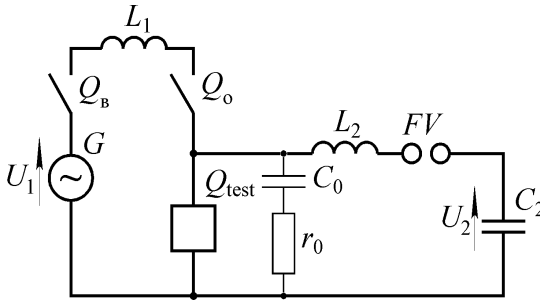


Figure 4.16 – Parallel current injection circuit (Weil-Dobke circuit)

The current source in this circuit is an impact-excited generator G of power frequency voltage U_1 . The oscillation circuit C_2 – L_2 , connected across the test breaker Q_{test} , serves as the high recovery voltage source. The parameters of the circuit are selected from the equality requirement of the current derivatives in both subcircuits at a current zero crossing. This is ensured under the following condition:

$$\frac{U_1}{L_1} = \frac{U_2}{L_2}. \quad (4.18)$$

Prior to the test, the contacts of Q_o and Q_{test} are in the closed position, and Q_b is in the open position. After the generator G has been speeded up and excited, the contacts of Q_b is closed, and power frequency current i_1 is started to flow through Q_o and Q_{test} that is shown in Figure 4.17.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}}. \quad (4.17)$$

Схема з паралельним накладенням струму. Ця схема була запропонована Ф. Вейлом у 1942 році, а пізніше була вдосконалена Г. Добке та іншими, отже часто її називають *схемою Вейла-Добке*. У даний час вона набула вельми широкого поширення, особливо для випробування вимикачів на граничні потужності вимикання. У цьому випадку економічно доцільним є побудова схеми зі сполученням ударного генератора і коливального контуру, як показано на рис. 4.16.

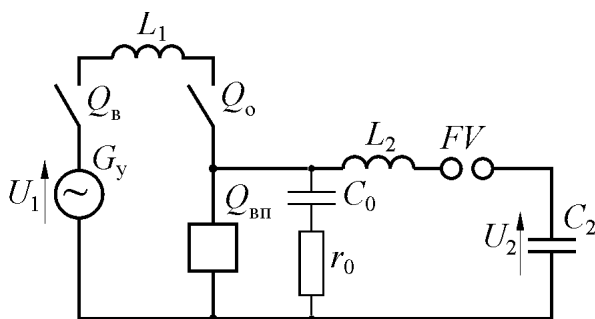


Рисунок 4.16 – Синтетична схема з паралельним накладенням струму

Джерелом струму у даній схемі є ударний генератор G_y з напругою U_1 промислової частоти. Джерелом високої напруги є коливальний контур C_2-L_2 високої напруги U_2 , який підключається паралельно випробуваному вимикачу $Q_{вп}$. Параметри контурів вибираються з умови рівності похідних струмів в обох контурах при їх підході до нульового значення. Це забезпечується при наступній умові:

$$\frac{U_1}{L_1} = \frac{U_2}{L_2}. \quad (4.18)$$

У початковому положенні контакти Q_o і $Q_{вп}$ замкнуті, а $Q_{в}$ – розімкнуті. Після розгону ударного генератора і подачі на нього збудження замикаються контакти $Q_{в}$ і через $Q_{вп}$ і Q_o починає проходити струм промислової частоти i_1 , як показано на рис. 4.17.

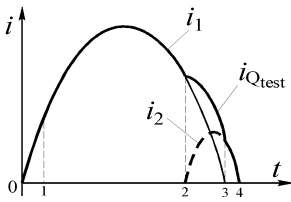


Figure 4.17 – Time diagrams for parallel current injection circuit

At time instant 1, the contacts of Q_0 and Q_{test} begin to open followed by the ignition of arcs in them, and current i_1 continues to flow. At instant 2 the spark gap FV is triggered and, thereby the recovery voltage source is connected to Q_{test} . From this point, the current through the test breaker is equal to the sum of the currents through the current and voltage sources: $i_{Q_{test}} = i_1 + i_2$. At

instant 3 the current in interrupting device Q_0 i_1 passes through zero, the arc extinguishes in it, thereby the test breaker Q_{test} becomes to be connected to the recovery voltage sources only. At instant 4 the current in the test breaker Q_{test} , equal to current i_2 , reaches zero value followed by the arc extinguishes and voltage recovers across its contacts. The parameters of TRV are defined by the values of r_0 , C_0 and L_2 .

Voltage injection method. The voltage injection method, in principle, is the same as the parallel current injection. The fundamental difference is that the high recovery voltage is injected across the contacts of the test breaker following the interruption of the short circuit current. When the short circuit current crosses its zero value, the test breaker opens. Practically at same instant, the auxiliary switch Q_0 also opens and thereby separates the test breaker from the current source. The only after that, the spark gap FV is triggered and recovery voltage is injected.

This method is less expensive compared to the current injection one because it allows the use of capacitor banks of a much smaller capacitance, since the current injected from the voltage source in this case is much smaller. However, it is not very popular because it requires accurate timing for the recovery voltage injection, which considerably complicates the control circuit.

Switching tests of circuit-breakers are frequently performed in especial conditions. In such cases, considered above series or parallel current injection circuit is supplemented with appropriate components.

In the process of switching tests, it is quite often necessary to simulate special operating conditions or duties for circuit-breakers. For example, interrupting a short-line fault, arcing during a few half-cycles, and others. In such cases, the discussed above series or parallel current injection circuits are supplemented with special devices that provide such conditions or duties.

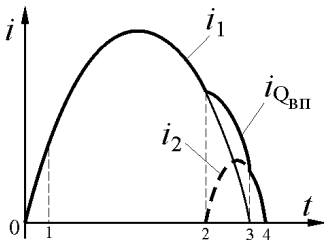


Рисунок 4.17 – Осцилограми струмів для схеми з паралельним накладенням струму

напруги. В момент 4 струм у $Q_{вп}$, що дорівнює струму i_2 , проходить через нульове значення, дуга в ньому згасає і на його контактах поновлюється напруга U_2 , яка обумовлена параметрами r_o , C_0 і L_2 .

Схема з накладенням напруги. За побудовою ця схема є аналогічною до схеми з паралельним накладенням струму. Принциповою відмінною є те, що висока поновлювана напруга подається на контакти випробуваного вимикача після вимикання струму короткого замикання. При проходженні струму короткого замикання через нульове значення практично одночасно вимикаються випробуваний вимикач і допоміжний вимикач Q_o , який відділяє випробуваний вимикач від джерела струму, і лише після цього спрацьовує розрядника FV і здійснюється подача поновлюваної напруги.

Ця схема є більш економічною у порівнянні зі схемою з накладенням струму бо дозволяє використовувати конденсаторні батареї значно меншої ємності, оскільки струм, що подається від джерела напруги у цьому випадку значно менше. Проте, вона не набула широкого використання, оскільки вимагає точної синхронізації моменту подачі поновлюваної напруги, що значно ускладнює схему керування.

В процесі комутаційних випробувань досить часто виникає необхідність відтворити спеціальні умови або режими роботи вимикачів. Наприклад, вимикання невіддаленого короткого замикання, існування дуги впродовж декількох напівперіодів та інші. В таких випадках розглянуті вище схеми з послідовним або паралельним накладенням струму доповнюються спеціальними пристроями, які забезпечують такі умови або режими.

В момент 1 розмикаються контакти Q_o і $Q_{вп}$, в них виникають дуги і продовжує текти струм i_1 . В момент 2 спрацьовує розрядник FV і контур поновлюваної напруги підключається до $Q_{вп}$. З цього моменту струм у вимикачі, що випробується, буде дорівнювати сумі: $i_{Q_{вп}} = i_1 + i_2$. В момент часу 3 струм i_1 проходить через нуль, дуга в ньому згасає і $Q_{вп}$ виявляється підключеним тільки до контуру поновлюваної напруги.

Short-line fault test. It is well known that a one of the heaviest condition for HV circuit-breakers is clearing short-line fault. This condition can be simulated in the circuit shown in Figure 4.18a. In this case, a conventional series current injection circuit is complemented by a short-circuited transmission line of given length, which is shunted by the arcing switch Q_{arc} . Figure 4.18b illustrates the operation of this circuit by the time diagrams of currents.

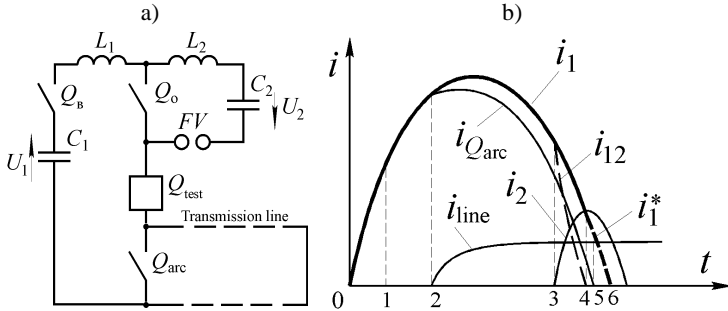


Figure 4.18 – Synthetic circuit for the short-line fault test (a); time diagrams of the currents (b)

In the same manner as in conventional synthetic circuit, at instant 0 making switch Q_B is closed and half-wave of power frequency current i_1 begins to flow through the current subcircuit, and at instant 1 the contacts of the test breaker and auxiliary breaker Q_o are opened. At instant 2 the contacts of Q_{arc} begin to open, thereby the arc with almost invariable voltage is initiated between them, which begins to charge the line by the current i_{line} . In the process, the current flowing through Q_{arc} is determined by the difference: $i_{Q_{arc}} = i_{Q_{test}} - i_{line}$.

At instants 3 and 4, the circuit operates similar to conventional circuit. At instant 5 (when $i_{Q_{arc}}$ reaches its zero value), the arc in Q_{arc} extinguishes and the line becomes to be connected into the test circuit. In such a way, the conditions, corresponding to short-line fault, are created in the circuit.

In the high-power laboratory, it is not very practical to use a real overhead transmission line for short-line fault testing, especially in the cases, when several lines in parallel should be connected according to the test conditions. For this reason, the short-line fault tests are frequently performed with application of *artificial lines (RLC circuits)*, which enables relatively simply to simulate transmission lines of any length.

Схема для відтворення невіддаленого к.з. Добре відомо, що одним з найбільш важких режимів є вимикання *невіддаленого короткого замикання*. Такий режим може бути відтворений в схемі, що надана на рис. 4.18а. У даному випадку звичайна синтетична схема з послідовним накладенням струму доповнюється дугогасним апаратом Q_d , паралельно якому підключається короткозамкнена лінія заданої довжини. На рис. 4.18б надано осцилограми струмів, які ілюструють функціонування схеми.

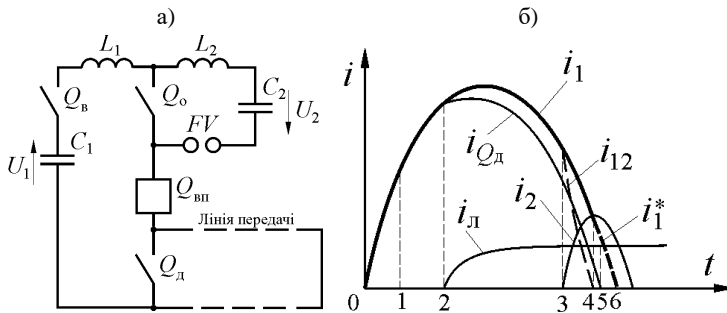


Рисунок 4.18 – Синтетична схема для випробувань в режимі невіддаленого к.з. (а); осцилограми струмів (б)

Так само як і у звичайній синтетичній схемі, у момент 0 вмикається вмикач Q_v , і в контурі струму починає текти півхвиля струму промислової частоти i_1 , а у момент 1 розмикаються контакти випробуваного вимикача та допоміжного вимикача Q_o . В момент 2 розмикаються контакти Q_d , між ними виникає електрична дуга з майже незмінною напругою, яка починає заряджати лінію струмом i_L . Струм у Q_d з цього моменту дорівнює різниці $i_{Q_d} = i_{Q_{vp}} - i_L$.

В моменти 3 та 4 схема функціонує так само як і звичайна схема. У момент часу 5 при переході i_{Q_d} через нуль дуга в Q_d гасне, і лінія виявляється включеною послідовно у випробний контур. Таким чином, у контурі створюються умови, що відповідають режиму невіддаленого к.з.

Випробування вимикачів в лабораторних умовах з використанням реальних ліній передач далеко не завжди можливо, особливо якщо потрібно включити паралельно декілька ліній. У зв'язку з цим, широке поширення при випробуваннях вимикачів в режимі невіддаленого к.з. набуло використання *штучних ліній (ланцюгових RLC схем)*, які дозволяють відносно просто відтворювати лінії будь-якої довжини.

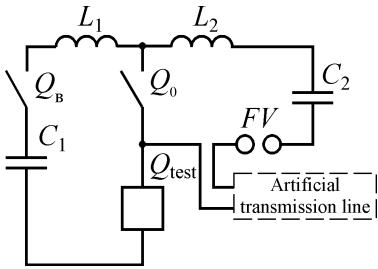


Figure 4.19 – Short-line fault test circuit with artificial transmission line

Substitution of a real line with an artificial one makes it possible to change the manner to connect the line into synthetic circuit and thereby simplify the synthetic circuit. In this case, there is no necessity to connect the artificial line near the ground point (as in the circuit considered above, see Fig. 4.18a). It can be disposed directly near the test breaker as shown in Figure 4.19.

An artificial transmission line is usually made of identical lumped LC networks, such as pi-networks shown in Figure 4.20a, T- networks shown in Figure 4.20b, or L- networks shown in Figure 4.20c, but there are other networks for constructing artificial lines.

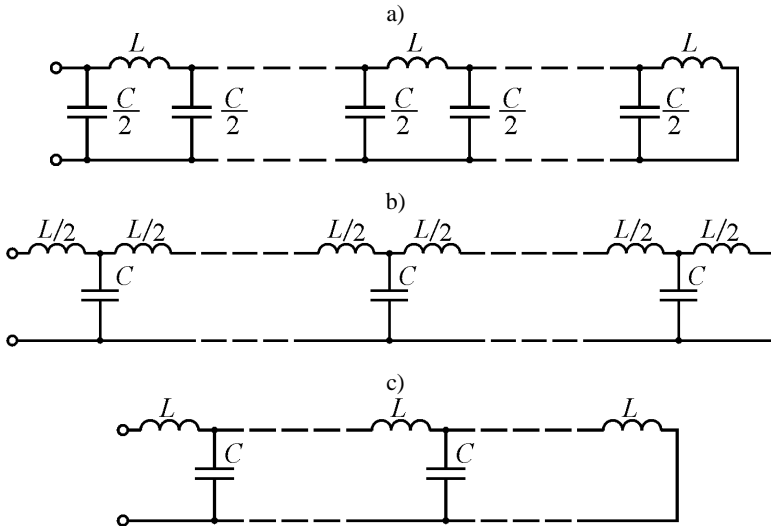


Figure 4.20 Artificial transmission lines made of Π -type circuits (a), T-type circuits (b), and L-type circuits (c).

The application experience of the artificial lines shows that they ensure the simulation of triangular (saw-tooth) oscillations of the recovery voltage in the case when the number of sections is in the range of 5 to 10 [41].

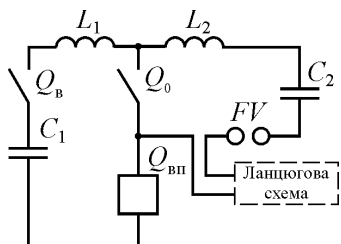


Рисунок 4.19 – Підключення ланцюгової схеми до випробного контуру

Заміна реальної лінії ланцюговою схемою дає можливість змінити спосіб її підключення і тим самим спростити синтетичну схему. У цьому випадку немає необхідності включати ланцюгову схему у точки заземлення, як у розглянутій вище схемі (див. рис. 4.18а), а безпосередньо у випробуваного вимикача, як показано на рис. 4.19.

Штучна лінія передачі за звичаєм виконується з ідентичних LC ланцюгових схем: П-ланок, рис. 4.20а, Т-ланок, рис. 4.210б, або Г-ланок, рис. 4.20в, але існують й інші схеми побудови штучних ліній.

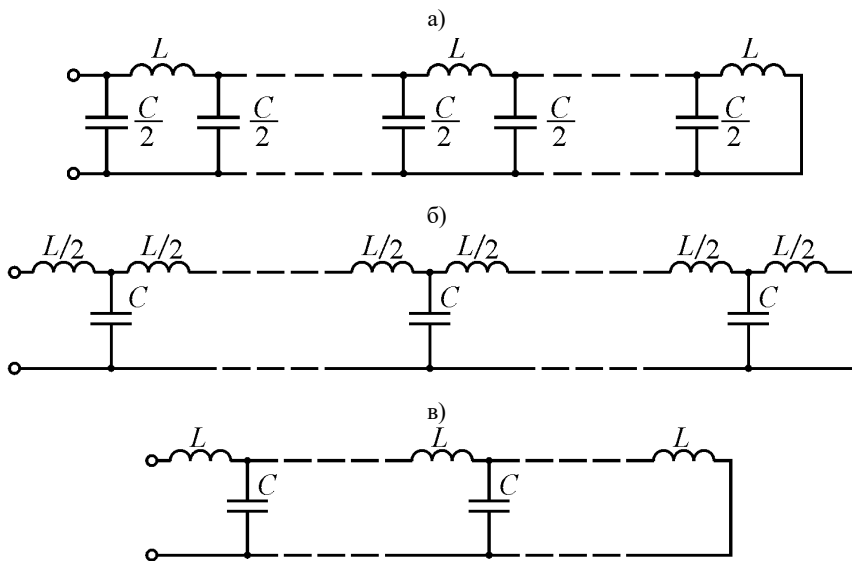


Рисунок 4.20 – Штучні лінії передач (ланцюгові схеми) виконані: з П-ланок; Т-ланок; Г-ланок

Досвід використання ланцюгових схем показав, що вони забезпечують еквівалентність випробувань, тобто відтворення трикутних коливань ППН, якщо кількість ланок не менше 5–10 [41].

The parameters of the artificial line are decided basing upon the predetermined values of the line length l (i.e., the distance from the breaker terminals to the fault location), as well as its wave impedance Z_{line} and running inductance of the line L_0 . For the decided number of sections n , the inductance and capacitance of the section are determined as follows:

$$L = \frac{l \cdot L_0}{n}; \quad C = \frac{L}{Z_{\text{line}}^2}. \quad (4.19)$$

At the same time, despite the relative simplicity, substitution of the line with distributed parameters by the artificial line may violate, in some degree, requirement as for test equivalence. Therefore, tests with the application of artificial lines are appropriate, when they are supplemented by network tests, when it is possible, or tests in synthetic circuit with application of actual transmission lines.

Testing with prolonged arcing. In certain cases, in compliance with testing conditions, there is necessity to prolong the arcing time for the breaker to be tested after current zero. In this case, the synthetic circuit must ensure arc re-ignition, which is usually carried out by the arc space is subjected to an ignition pulse the at the current-zero instant. Figure 4.21 represents one of the circuits that enables this to be ensured.

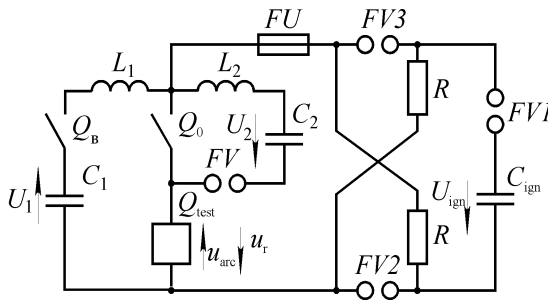


Figure 4.21 – Circuit diagram for the testing with prolonged arcing

The ignition pulse is generated by the capacitor bank C_{ign} disconnected from the test circuit by the spark gaps $FV1$, $FV2$, $FV3$. In burning the arc between the contacts of the test breaker, the voltage U_{arc} across Q_0 and Q_{test} are directed opposite to U_{ign} and the voltage $U_{\text{ign}} - u_{\text{arc}}$ acting to the spark gap $FV1$ does not cause its triggering.

Параметри ланцюгової схеми вибираються виходячи з заданих значень довжини лінії l (тобто відстані від вимикача до місця к.з.), а також її хвильового опору $Z_{\text{л}}$ та погонної індуктивності лінії L_0 . При обраній кількості ланок n , індуктивність і ємність ланки визначаються за такими виразами:

$$L = \frac{l \cdot L_0}{n}; \quad C = \frac{L}{Z_{\text{line}}^2}. \quad (4.19)$$

Разом з тим, незважаючи на відносну простоту, заміна лінії з розподіленими параметрами ланцюговою схемою може дещо порушити умови еквівалентності випробувань. Тому випробування з використанням ланцюгових схем доцільно доповнювати, коли це виявляється можливим, мережевими випробуваннями або випробуваннями в синтетичній схемі з використанням реальної лінії передачі.

Схема з продовженням існування дуги. В ряді випадків за умовами випробувань існує потреба продовжити час горіння дуги між контактами випробуваного апарата. У цьому випадку синтетична схема повинна забезпечувати повторне запалювання дуги і, яке за звичаєм здійснюється дією запалювального імпульсу на міжконтактний проміжок під час переходу струму дуги через нуль. Одна з схем, що дозволяють це забезпечити, надана на рис. 4.21.

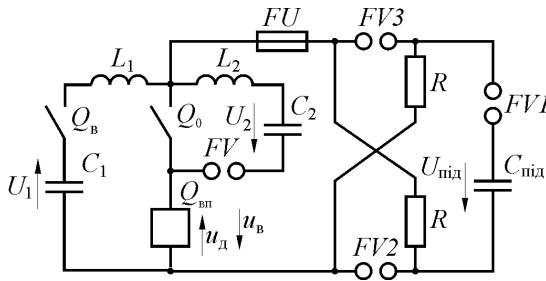


Рисунок 4.21 – Схема з продовженням горіння дуги

Запалювальний імпульс створюється за допомогою конденсаторної батареї $C_{\text{під}}$, яка відокремлена від випробувального контуру розрядниками $FV1$, $FV2$, $FV3$. Під час існування дугового розряду напруга $u_{\text{д}}$ на $Q_{\text{вп}}$ спрямована зустрічно по відношенню до $U_{\text{під}}$ і на розрядник $FV1$ діє напруга $U_{\text{під}} - u_{\text{д}}$, яка не призводить до його спрацьовування.

During the recovery voltage process, it undergo the action of the voltage defined by the sum $U_{\text{ign}} + u_r$ (since recovery voltage u_r coincides in direction with U_{ign}) that lead to triggering the spark gap $FV1$, and then triggering the spark gaps $FV2$ and $FV3$. As a result, the capacitor bank C_{ign} is connected to the Q_o and Q_{test} , and initiates arc discharge in them.

To eliminate the influence of the capacitance C_{ign} on the TRV parameters, the fuse FU , actuating under passing of the ignition pulse, is used. The arc, initiated in the process, is rapidly extinguished.

The conceptual shortcoming of this circuit is the fact that the ignition pulse affects the arc spaces of the switches Q_o and Q_{test} during the recovery process, when they have been already deionized enough. In the process, significant energy is necessary for arc reignition that necessitates application of capacitor banks of significant capacitance.

Application of inductive energy storage. The integration of power generating units at power stations, as well as the need to enhance the reliability of power supply necessitate the so-called *generator circuit-breakers* to be installed between the generator and transformer at the unit. The construction of 1000 MVA power units and higher power ones requires the use of generator circuit-breakers with rated 160 kA short-circuit current containing a very high (100 % and above) DC component at the voltage in the range of 24 to 35 kV.

The noted parameters exceed the capabilities of available test setups. To enhance their test capabilities by increasing the capacity or number of impact-excited generators involves in significant capital investments. The application of current sources based on *inductive energy storages* in synthetic circuits is sufficiently effective alternative. Their basic advantages are the constructive simplicity and the high specific accumulated energy, so their use enables significantly increase the testing capabilities of test facilities at relatively low costs. Now, inductive storage devices are not extensively used, but their creation is a promising direction in the technique of switching tests [48].

У процесі поновлення напруги після нуля струму на нього впливає напруга, яка дорівнює сумі $u_{\text{п}} + U_{\text{під}}$ (оскільки поновлювана напруга $u_{\text{п}}$ діє у протилежному напрямку), під дією якого спрацьовує розрядник *FV1*, а потім і розрядники *FV2* і *FV3*. Таким чином, батарея $C_{\text{під}}$ підключається паралельно до $Q_{\text{о}}$ і $Q_{\text{вп}}$, збуджуючі в них електричні дуги.

Для усунення впливу ємності $C_{\text{під}}$ на параметри ППН в схемі застосовано запобіжник *FU*, який при проходженні запалювального імпульсу спрацьовує; а дуга, що утворюється при цьому, швидко згасає.

Основним недоліком схеми є та обставина, що запалювальний імпульс діє на дугові проміжки апаратів $Q_{\text{о}}$ і $Q_{\text{вп}}$ в процесі поновлення напруги, коли проміжки вже досить деіонізовані, що змушує застосувати конденсаторні батареї значної ємності, щоб забезпечити одержання необхідної для підпалювання енергії.

Використання індуктивних накопичувачів енергії. Укрупнення енергоблоків на електростанціях, а також необхідність підвищення надійності електропостачання обумовили установку у колі між генератором і трансформатором так званих *генераторних вимикачів*. Спорудження енергоблоків потужністю 1000 кВА і більш вимагає застосування генераторних вимикачів з номінальними струмами вимикання 160 кА з дуже великою (до 100% і вище) аперіодичною складовою при напрузі 24–35 кВ.

Зазначені параметри перевищують можливості існуючих випробних установок. Підвищення випробних можливостей шляхом збільшення потужності ударних генераторів або їх кількості вимагають значних капіталовкладень. Вельми ефективною альтернативою є використання у синтетичних схемах в якості джерела струму *індуктивних накопичувачів енергії*. Основними їх перевагами є простота конструкції і висока питома енергія, що запасється, отже їх використання дозволяє значно підвищити випробувальні можливості випробних установок при відносно невеликих витратах. В даний час індуктивні накопичувачі не набули широкого використання, проте їх створення є перспективним напрямом у техніці комутаційних випробувань [48].

5. OTHER TESTING TECHNIQUES OF ELECTRICAL AND POWER ELECTRONIC APPARATUS

5.1 Research and Testing for Temperature-rise in Rated Duty

It is well known that one of the main operating conditions of electrical and power electronic apparatus is the nominal (design) condition, when the electrical installation operates in normal circumstances. This duty is characterized by a long-term flowing load current that causes main (Joule's) and additional losses in the current-carrying parts of the apparatus that results in their heating, as well as heating of adjacent components. Under the action of alternating electromagnetic fields produced by current-carrying components, the apparatus constructive components (free from a current load) also generate thermal losses. Elements of electromagnetic systems, such as windings and magnetic circuits are also thermal sources in electrical apparatus. The most concentrative thermal source of power electronic devices are power semiconductor devices that require special cooling systems.

It should be also noted that calculations relating to evaluation of thermal behavior of electrical and power electronic apparatus are highly complicated. It is practically impossible to calculate the main and additional losses, as well as the temperatures of all parts of a complex apparatus or a complete device, taking into account all factors and with a sufficient degree of accuracy. Thus, the experimental determination of the thermal behavior of the apparatus and its individual elements is the most objective and accurate, and just at the stage of R&D-works the temperature-rise investigations and tests are especially topical and urgent.

There are various types of tests involved in verification of thermal behavior of electric equipment and its components. Among them, *testing under long-term flowing load current*, called frequently *loading test*, is most essential. The main tasks of these tests are the following.

First, the task is to determine the rated current of the apparatus under development, in the given operating duty, at the near ultimate permissible temperatures of its current-carrying parts; in this case, the so-called *maximum current test* is performed. Such type of tests are usually performed at R&D stage and are research ones. The value of the maximum current in this case is usually determined by the way of recalculations according to the following expression:

5. ІНШІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ВИПРОБУВАНЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА ЕЛЕКТРОННИХ АПАРАТІВ

5.1 Дослідження та випробування на нагрів у номінальному режимі

Добре відомо, що одним з основних режимів роботи електроустановок та, відповідно, електричних та електронних апаратів, є номінальний режим, який характеризується тривалим проходженням струму навантаження. При цьому, у струмоведучих частинах апарата виникають основні та додаткові втрати, наслідком якого є їх нагрів, а також нагрів поряд розташованих елементів. Під дією змінних електромагнітних полів, які утворюються струмоведучими елементами, теплові втрати виникають також в елементах конструкції апаратів. Джерелами тепла в електричних апаратах є також елементи електромагнітних систем: обмотки та магнітні кола. Найбільш концентрованим джерелом теплової енергії силових електронних апаратів є силові напівпровідникові прилади, які потребують спеціальних систем охолодження.

Слід також відзначити, що розрахунковий аналіз теплового режиму електричних та електронних апаратів являє собою досить складну задачу. Визначити розрахунковим шляхом основні та додаткові втрати, а також температури всіх частин складного апарата або комплексного пристрою, з урахуванням усіх чинників і з достатнім ступенем точності, практично неможливо. Отже, експериментальне визначення теплового режиму апарата й окремих його елементів є найбільше об'єктивним і точним, і саме на стадії проектування дослідження теплових режимів апаратів та випробування на нагрів особливо актуальні й необхідні.

Існують різні види випробувань, які пов'язані з перевіркою теплових режимів апаратів і їх елементів. Серед них істотна роль приділяється *випробуванням на нагрів при тривалому протіканні струму навантаження*, тому їх часто називають *навантажувальними випробуваннями*. Основними задачами даних випробувань є наступні.

По-перше, це визначення номінального струму апарата, що розробляється, у заданому режимі роботи, при температурах струмоведучих частин, близьких до допустимих; у цьому випадку проводять *випробування на максимальний струм*. Такі випробування проводяться, як правило, на стадії розробки апарата і є дослідницькими. Величина максимального струму у цьому випадку визначається за звичаєм шляхом перерахунку у відповідності до наступного виразу:

$$I_{\max} = I_1 \left(\frac{\tau_1}{\tau_2} \right)^{0,5},$$

where I_1 is the current passing through the test object, when it was tested; τ_1 is the steady state temperature-rise measured during the test; τ_2 is the permissible temperature-rise as per valid Specs.

No less important task of the temperature-rise tests is to verify the compliance with Specs in respect to heating the current-carrying parts under continuously flowing rated current called *temperature measurement test*. This test is also included usually to the program of periodic and type tests. Besides, this test is performed to estimate the results of other tests, such as switching and mechanical life, peak and short-time withstand current, switching capability etc.

The power supply of the test circuit must provide the required type of current, which must correspond to that for which the apparatus being tested is designed. At alternating current, the test circuit is usually supplied from a step-down high-current transformer with output voltage of a few volts. Three-phase apparatuses must be tested with three-phase current. At direct current, a separately-excited generator or a rectifier is usually used. The main measuring means used for testing are temperature sensors; the most extensive application in this case is thermocouples (see section 2).

Ambient temperature in testing must comply with the maximum one for the apparatus to be tested; accordingly, the device should be placed in a heating chamber. However, in certain cases, it is admitted to perform the test at a lower ambient temperature provided by corresponding corrections of the test results. The ambient temperature is usually measured at a distance at least one meter away from the test apparatus. Prior to testing, it should be taken measures excluding additional heating the test apparatus by extraneous heat sources (space heaters, direct solar radiation etc.), as well as additional cooling the apparatus by the extraneous factors (airflow from a ventilator, draughts, etc.).

In order to perform the temperature-rise test, the apparatus to be tested is installed in its operating position. If the apparatus has several operating positions, then it is installed in most unfavorable position from the standpoint of its thermal behavior. Thermal behavior of the apparatus current-carrying parts is substantially influenced by the parameters of the conductors connecting the test apparatus with the power supply, such as cross-sectional area, length, and their cooling conditions. Therefore, their parameters are established by test engineering specifications.

$$I_{\text{макс}} = I_1 \left(\frac{\tau_1}{\tau_2} \right)^{0,5},$$

де I_1 – струм, що протікає через апарат в процесі випробувань; τ_1 – стале перевищення температури, здобуте при випробуваннях; τ_2 – допустиме перевищення температури відповідно до стандартів.

Не менш важливим завданням випробувань на нагрів є перевірка відповідності нормам нагріву струмоведаччих частин апарата при триваломому протіканні номінального струму. Такий вид випробувань за звичаєм є складовою частиною періодичних та типових випробувань. Крім того, такі випробування часто проводять з метою оцінки результатів інших випробувань, а саме випробувань на комутаційну та механічну зносостійкість, на комутаційну спроможність, на електродинамічну і термічну стійкість і т.д.

Джерело живлення випробувальної установки повинно забезпечувати потрібний рід струму, який повинен відповідати роду струму апарата. При змінному струмі джерелом живлення при випробуваннях на нагрів, як правило, є понижувальний трансформатор, на виході якого напруга складає одиниці вольт. Трифазні апарати повинні випробуватися трифазним струмом. При постійному струмі, як правило використовують генератор з незалежним збудженням або випрямляч. Основними вимірювальними засобами при випробуваннях є датчики температури, в якості яких найбільш часто використовують термомпари (див. розділ 2).

Температура навколишнього середовища при випробуваннях має дорівнювати максимальній для випробуваного апарата, відповідно апарат має розміщуватись у камері тепла. Проте, у певних випадках допускається проводити випробування при меншій температурі при внесенні в результати випробувань відповідних поправок. Контроль температури навколишнього середовища здійснюється, як правило, на відстані не менше 1 м від випробуваного апарата. При проведенні випробувань повинні бути прийняті заходи, які виключають нагрів апарата від сторонніх джерел тепла (батареї опалення, прямих сонячних променів і т.п.), а також охолодження апарата сторонніми чинниками (потік повітря від вентилятора, протяги і т.п.).

Випробування на нагрів проводяться у робочому положенні апарата; якщо їх декілька, то вибирають найбільше несприятливе з погляду теплового режиму. Істотно на тепловий режим струмоведаччих частин потужних апаратів впливають параметри струмоведаччих частин, що з'єднують випробуваний апарат з джерелом живлення. Відіграє роль як їх поперечний перетин, так і їх довжина, тому вони спеціально обумовлюються нормативно-технічною документацією на випробування.

Besides the current-carrying parts of power circuits, such components of electrical equipment as windings of electromagnetic systems for various applications, auxiliary contacts etc., are also the objects of temperature-rise tests. The tests of different components of the apparatus should be performed simultaneously, if the mutual heat exchange between them takes place. The location of the temperature sensors must comply with the program and test procedure for the appropriate type of device.

In the course of testing, the temperature-rise magnitudes are measured at regular intervals until the steady state temperatures have reached (for long-term duty). The test findings are logged to a register and the heating curves are plotted. The temperature is considered as have been reached of steady state value, when during a one hour under load operation the change in the temperature being measured does not exceed one degree. In the case of testing under intermittent load, the process is considered as quasi-stationary, when the difference between two sequential temperature peaks does not exceed five degrees. The temperature-rise test findings (i.e. the values measured at steady state temperatures) are compared with permissible norms in compliance with valid standards and Specs.

It is known that the heating time of the device to a steady state temperature is approximately 3–5 times longer than its thermal time constant, which frequently comprises tens of minutes or even hours. Therefore, temperature-rise tests of electrical and electronic apparatuses require quite a lot of time.

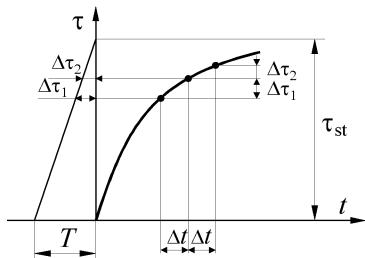


Figure 5.1 – Determining steady state temperature

There exist two main techniques, which enable to speed up the tests. The first method is to use the so-called *forced heating*, that is, heating the device at the first stage with an increased (two to three times) current. In the second stage, when the temperature-rise approaches a steady state value, the current is reduced to the nominal value. Of course, the thermal time constant of the device and its

steady state temperature should be approximately known. The second method consists in graphically determining the steady state temperature by using the initial section of the heating curve taken in passing the nominal current as shown in Figure 5.1.

Об'єктами випробувань на нагрів в електричних апаратах, поряд із струмоведучими частинами силових кіл, є також обмотки електромагнітних систем різного призначення, допоміжні контакти і т.п. Причому, випробування різних елементів повинні проводитися одночасно, якщо відбувається їх взаємний тепловий вплив. Розташування датчиків температури повинно відповідати програмі та методиці випробувань на відповідний тип апарата.

В процесі випробувань через рівні проміжки часу проводять вимірювання перевищення температури над температурою навколишнього середовища до досягнення ними сталої температури (при тривалому режимі роботи). Результати вимірювань заносять у робочий журнал, за якими будують графіки кривих нагріву. Температуру вважають сталою, якщо протягом години роботи апарата під навантаженням змінення температури струмоведучих частин не перевищує одного градуса. При випробуваннях у повторно-короткочасних режимах процес вважається квазісталім, якщо різниця між двома послідовними максимумами не перевищує 5°C . Здобуті в результаті випробувань сталі значення температур порівнюють з допустимими нормами відповідно до діючих стандартів.

Відомо, що час нагріву апарата до сталої температури приблизно в 3–5 разів більше його теплової постійної часу, що найчастіше складає десятки хвилин, а то й години. Отже випробування на нагрів електричних та електронних апаратів вимагають досить багато часу.

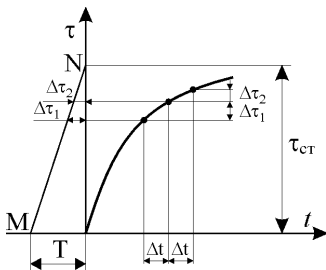


Рисунок 5.1 – Визначення сталої перевищення температури

Існують два основних способи, що дозволяють прискорити випробування. Перший спосіб полягає у використанні т.з. *форсованого нагріву*, тобто нагрівання апарата на першому етапі збільшеним (у два-три рази) струмом. На другому етапі, коли перевищення температури наближується до сталої значення, струм знижується до номінального значення. При цьому, звичайно, орієнтовно повинні бути відомі

теплова постійна часу апарата і стала температура його нагріву. Другий спосіб полягає у графічному визначенні сталої температури шляхом використання початкової ділянки кривої нагріву, рис. 5.1, знятої при проходженні номінального струму.

5.2 Peak and Short-time Withstand Current Tests

The main purpose of these tests is to verify the capability of the apparatus to withstand the thermal and electrodynamic action of let-through short-circuit currents. Such requirements are imposed almost upon all types of electric apparatus independently on their application.

These tests include two test types, namely, *peak withstand current test* (test for electrodynamic stability) and *short-time withstand current test* (test for thermal stability). It should be noted that both test types are frequently performed at one trial. As a power supply, in this case, frequently the same equipment as for switching tests is used; in particular, short-circuit generator (impact-excited generator or oscillation circuit) or power network. Driving voltage and power of the short-circuit generator should be sufficient to maintain the short-circuit current with specified parameters (including the cases when the contact load is weakened or the contacts are separated under action of blow-off forces).

Prior to testing, the apparatus mechanisms are checked in respect to functioning by the way of make-break operations at the absence of the current load (3–5 cycles). In order to perform the test, the completely assembled apparatus is installed into operating position. In some cases, testing is admitted to perform for individual components of the apparatus, if it is found that distribution of electrodynamic forces will not change. The switching device contacts must be in closed position; in the process, the minimal value of the contact pressure, in compliance with Specs, is set. The current-carrying system, whenever possible, should produce the most unfavorable conditions in terms of the action of the electrodynamic forces.

Tests are performed by short-term passing the short-circuit current; its parameters that should correspond to the values of peak and short-time withstand currents established by Specs and standards for the apparatus being tested. To ensure the required ratio between the peak of the short-circuit current and its steady state value, the test circuit should be set into energization at certain time instant. It is usually made with the help of the so-called *phase discriminator*. In the case, when the phase discriminator is not available, this ratio may be ensured by insertion of series resistance (after a laps of time corresponding to 2–3 cycles) that decreases steady state value of the short-circuit current down to required value.

5.2 Випробування на стійкість при наскрізних струмах короткого замикання

Основною метою даного виду випробувань є перевірка стійкості апаратів термічній та електродинамічній дії наскрізних струмів короткого замикання. Такі вимоги пред'являються практично до усіх видів електричних апаратів, незалежно від їх призначення.

Даний вид випробувань містить у собі два види випробувань: *випробування на електродинамічну стійкість* і *випробування на термічну стійкість*. Слід відзначити, що досить часто обидва види випробувань проводять в одному досліді. При проведенні випробувань використовується практично те ж обладнання, що й при проведенні комутаційних випробувань. Зокрема, в якості джерела живлення використовуються ГІС (коливальний контур або ударний генератор) або силова мережа. Напруга і потужність джерела живлення повинні бути достатніми для забезпечення струму к.з. заданих параметрів, навіть при ослабленні контактного натиску або відкидання контактів під дією електродинамічних сил.

Перед випробуваннями здійснюється перевірка справності механізмів апарата безструмовою комутацією (3–5 циклів). Для проведення випробувань цілком зібраний апарат встановлюється у робоче положення. У деяких випадках допускається проводити випробування окремих елементів апарата, якщо встановлено, що це не вплине на величину і розподіл електродинамічних зусиль. Контакти комутаційного апарата повинні бути у замкнутому положенні, при цьому встановлюється мінімально припустима за технічними умовами (ТУ) величина контактної натисненості. Струмоведачий контур, по можливості, повинен відтворювати найбільше несприятливі (за дією електродинамічних зусиль) умови.

Випробування проводяться короточасним пропусканням струму к.з., параметри якого повинні відповідати струму електродинамічної та термічної стійкості, зазначеним у ТУ і стандартах на відповідний тип апарату. Для забезпечення заданого відношення ударного струму к.з. до сталого його значення найчастіше використовується фазовий дискримінатор, який дозволяє включати випробну установку в заданий момент часу. При відсутності фазового дискримінатора це співвідношення може бути витримане уведенням додаткового опору (після закінчення 2–3 напівперіодів), який знижує сталий струм к.з. до заданого значення.

If this cannot be realized, then tests are performed at a given peak short-circuit current, and the current passage time is adjusted so that the thermal effect of the current (specified Joule integral) corresponds to the permissible value. It is also admitted to perform separately peak and short-time withstand current tests.

The peak withstand current test (i.e., test for electrodynamic stability) is performed by conducting the specified peak withstand current during 3–10 half-cycles of power frequency. The short-time withstand current test (i.e., test for thermal stability) is performed by conducting the short-time withstand current with rms value and duration in compliance with Specs of the apparatus.

Heating temperature in short-time withstand current testing is measured in the same way as in temperature-rise testing at nominal operation using thermocouples (see subsection 5.1).

The apparatus is considered as have withstood peak and short-time withstand current tests, if the damages, inhibiting its further normal operation, was not detected. It can be inelastic deformations, insulation mechanical damages, stable welding of the contacts, their blowing off (it is detected by drastic rise of the voltage drop across the contacts), as well as inadmissible temperature-rises of the apparatus components. After these tests the temperature-rise test under rated current is usually performed.

5.3 Electromechanical and Electromagnetic Research and Testing

It is well-known that significant part of electrical apparatus is electro-mechanical or electromagnetic devices; a number of the apparatus contain electromagnetic components. Therefore, electromechanical and electromagnetic researches and testing occupy important place in general content of researches and testing of electric apparatus.

Electromechanical testing include a whole range of various measurements and checks, according to the apparatus type. For example, the following checks and measurements are typical for high and low voltage switching devices:

- *functional check*: check as for functioning of the device mechanism in execution of close-open operations at the absence of current load;
- *measurement of actuation parameters*: measuring the response time and current when the apparatus is called to open or close operation;

Якщо це неможливо здійснити, то проводять випробування при заданому значенні ударного струму к.з., а час протікання наскрізного струму встановлюють таким, щоб його теплова дія (джоулев інтеграл) відповідала ТУ на апарат. Допускається також проводити роздільні випробування на електродинамічну і термічну стійкість:

а) шляхом пропускання струму з ударним його значенням, що відповідає заданому, протягом 3–10 півперіодів промислової частоти;

б) шляхом пропускання струму, середньоквадратичне значення якого і час його протікання відповідає ТУ на апарат.

Контроль температури нагріву при випробуваннях на термічну стійкість здійснюється аналогічно випробуванням на нагрів номінальними струмами за допомогою термопар (див. підрозд. 5.1)

Апарат вважається таким, що витримав випробування наскрізними струмами к.з., якщо не виявлено ушкоджень, що можуть перешкоджати його нормальній подальшій роботі: непружних деформацій, ушкоджень ізоляції, стійкого приварювання контактів, відкидання контактів (контролюється по різкому збільшенню падіння напруги на контактах), а також неприпустимого перевищення температур елементів апарата. Після випробувань наскрізним струмом к.з. за звичаєм проводяться випробування на нагрів номінальним струмом.

5.3 Електромеханічні та електромагнітні дослідження та випробування

Добре відомо, що значна частина електричних апаратів є електромеханічними або електромагнітними пристроями; цілий ряд апаратів містять електромагнітні елементи. Отже, електромеханічні та електромагнітні дослідження та випробування займають важливе місце в загальному обсязі досліджень та випробувань електричних апаратів.

Електромеханічні випробування містять цілий комплекс різних вимірювань і перевірок, залежно від виду апарата. Наприклад, для комутаційних апаратів високої та низької напруги характерними є такі перевірки та вимірювання:

- *перевірка функціонування*: перевірка функціонування механізму апарата при вмикання та вимикання при відсутності струмового навантаження;

- *визначення параметрів спрацьовування*: вимірювання часу та струму спрацьовування при вмиканні та вимиканні;

- *measurement of contact loads*: measuring the contact load of switching (main and auxiliary) contacts, as well as contact connections;
- *measurement of dc resistance*: measuring the resistance or voltage drop of current-conducting systems of devices, windings of measuring transformers and other elements under flowing direct current.

As an example, consider the content of electromechanical tests of the devices for step-voltage regulation in power transformers under load usually called *on-load tap-changers*. First and foremost, it should be noted that an on-load tap-changer is one of the most complex electromechanical switching devices. It contains a number of mechanisms and contacts having different functional purpose and operating in strictly predetermined sequence [26, 46]. The main purpose of electromechanical testing of an on-load tap-changer is to check the functioning of its mechanisms and contacts, as well as the correct sequence of their operation. Electromechanical testing include the following checks and measurements [35, 46]:

- contact loads of the tap selector and diverter (arcing) switch contacts, which usually refer to *mechanical test*;
- resistance and voltage drop of current-carrying parts of the selector and load-changer (*transition impedance test*);
- torques on the shaft of the driving mechanism and individual components of the device (*mechanical load test*);
- correctness of the driving mechanism functioning (*mechanical test*);
- sequence of operation of the contacts and mechanisms called usually *sequence test*.

One of the most important examinations performed in electromechanical testing is verification of operating sequence of the contacts and mechanisms, because its correctness is one of the main factors of the correct and reliable operation of the on-load tap-changer and the power transformer as whole.

The sequence of the on-load tap-changer contacts are verified by the measurement of diagrams of operation of the contacts, also called *circle* and *time diagrams*. They are measured during the manufacture and adjustment of the tap-changer, separately for selector and separately for diverter, using usually the method of signal lamps.

- *визначення контактних натисень*: вимірювання контактних натисень комутуючих головних та допоміжних контактів, а також контактних з'єднань;

- *визначення опору постійному струму*: вимірювання опору або падіння напруги струмопровідних систем апаратів, обмоток вимірювальних трансформаторів та інших елементів при протіканні постійного струму.

Як приклад, розглянемо зміст електромеханічних випробувань пристроїв регулювання напруги трансформаторів під навантаженням (пристрої РПН або перемикальні пристрої). Поперед за все слід зазначити, що пристрій РПН є одним з найскладніших електромеханічних комутаційних апаратів. Він містить цілу низку механізмів і контактів, що мають різне функціональне призначення і повинні працювати у точно заданій послідовності [26, 46]. Отже, основною метою електромеханічних випробувань пристрою РПН є перевірка функціонування його механізмів та контактних систем, а також правильної послідовності їхньої дії. У процесі електромеханічних випробувань перевіряють [35, 46]:

- контактні натисення контактів вибірника та контактора;
- опір та падіння напруги струмопровідних систем вибірника та контактора;
- моменти на валу приводного механізму та окремих елементів пристрою;
- правильність функціонування приводного механізму;
- послідовність дії контактів та механізмів.

Однією з найважливіших перевірок, які здійснюються в процесі електромеханічних випробувань перемикальних пристроїв є перевірка послідовності дії контактів і механізмів, оскільки її правильність є одним із головних факторів правильної та надійної роботи пристрою РПН та в цілому силового трансформатора.

Послідовність дії контактів пристрою РПН перевіряють шляхом зняття діаграм роботи контактів, які за звичаєм називають *круговими і часовими діаграмами*. Їх знімають при виготовленні та налагодженні перемикаючого пристрою методом сигнальних ламп, окремо для вибірників та окремо для контакторів.

In acceptance testing of each manufactured device and a transformer equipped by an on-load tap-changer, a circle diagram of the common operation of the selector and the diverter, as well as the time diagram of the action of the diverter contacts are measured usually by means of oscillography. In type testing, the selector circle diagram and the time diagram of the operation of the diverter are taken on a test bench. Circle and time diagrams are also measured when installing the transformer at the operation site, during audits and repairs related to the substitution of units or members of the on-load tap-changer or with the lifting of the transformer active part. [35, 46].

Electromagnetic tests. The main objects of electromagnetic tests are electromagnetic components of electrical and power electronic apparatus, as well as their individual elements, such as magnetic circuits and windings. It should be noted that the content of electromagnetic tests is defined by the purpose of the component. As an example, let us consider the main types of measurements and checks typical for electromagnetic instrument transformers [8, 34]:

- *magnetizing current measurement* for the magnetic circuit performed during the operational control after the magnetic circuit has been assembled;
- *no-load current and losses measurements* performed usually during the acceptance tests; the resultant values should not exceed the permissible ones;
- *verification for designation correctness of the windings terminals* performed usually during the operational control after the windings have been installed;
- *verification of connection group of the windings* performed in acceptance testing;
- *error measurements*: the errors are usually measured during acceptance tests under the loads corresponding the highest accuracy rating and in the course of type tests under the loads corresponding all accuracy ratings;
- *transformer ratio measurements* performed in acceptance testing.

5.4 Electrical Tests of Power Electronic Apparatus

Power electronic apparatus are, first, semiconductor converters of electrical energy, namely, rectifiers, inverters, frequency converters, AC and DC converters. The main component base of power electronic apparatus are power semiconductor devices (PSCDs): diodes, transistors and thyristors of various types, as well as power electronic modules.

При контрольних випробуваннях кожного пристрою та трансформатора з РПН знімається кругова діаграма спільної роботи вибірника і контактора та часова діаграма дії контактів контактора шляхом осцилографування. При типових випробуваннях на випробувальному стенді знімається кругова діаграма вибірника та часова діаграма роботи контактора. Під час монтажу трансформатора на місці експлуатації, при ревізіях та ремонтах, пов'язаних із заміною частин або деталей пристрою РПН або з підйомом активної частини трансформатора також знімають кругову та часову діаграми. [35, 46].

Електромагнітні випробування. Основними об'єктами електромагнітних випробувань є електромагнітні пристрої електричних та електронних апаратів, а також окремі їх елементи: магнітопроводи та обмотки. Слід зазначити, що зміст електромагнітних випробувань визначається призначенням пристрою. Як приклад, розглянемо основні види вимірювань та перевірок, які є типовими для електромагнітних вимірювальних трансформаторів [8, 34]:

- *вимірювання струму намагнічування магнітопроводу*: проводиться, як правило, під час операційного контролю після виготовлення магнітопроводу;

- *вимірювання втрат і струму холостого ходу*: проводиться, як правило, при приймально-здавальних випробуваннях; виміряні величини втрат і струму холостого ходу не повинні перевищувати допустимих значень;

- *перевірка правильності позначення виводів обмоток*: проводиться, як правило, під час операційного контролю після встановлення обмоток;

- *перевірка групи з'єднання обмоток*: проводиться, як правило, при приймальних випробуваннях;

- *вимірювання похибок*: проводяться при приймальних випробуваннях (при навантаженнях, що відповідають вищому класу точності) та типових випробуваннях (при навантаженнях, що відповідають усім класам точності);

- *вимірювання коефіцієнтів трансформації*: проводиться, як правило, при приймально-здавальних випробуваннях.

5.4 Електричні випробування силових електронних апаратів

До силових електронних апаратів відносять, поперед за все, напівпровідникові перетворювачі електричної енергії, а саме, випрямлячі, інвертори, перетворювачі частоти, перетворювачі змінної та постійної напруги. Основною елементною базою силових електронних апаратів є силові напівпровідникові прилади (СНПП): діоди, транзистори та тиристори самих різних типів, а також силові напівпровідникові модулі.

The most essential properties of PSCDs are their ability to carry out arc-free switching of electric circuits; in addition, they are able to ensure high speed and frequency of actuation of the apparatus, its reliability, increased life and low operating costs. Therefore, PSCDs are extensively used now also for the construction of power switching devices, which, besides make-break operation functions in electric circuits, are able to regulate the meanvalues of current and voltage that is of great importance for automated electric drive system applications. Such devices enable us not only the start and stop of induction motors, but also their smooth rotation speed control and braking with no application of special start-up control devices.

It is also necessary to note the use of PSCDs for the construction of HV converters and switching devices.

Note that PSCD and modules are the weakest link of power electronic devices that limits the area of their application and determines certain features of programs and methods of their electrical tests. Nevertheless, some types of electrical tests of power electronic apparatus in their technology are practically no different from similar tests of electrical apparatus. In compliance with the standards and Specs, power electronic apparatus pass the following types of electrical tests [36, 37]:

Dielectric tests. The main types of dielectric (insulation) tests of low-voltage power electronic apparatus are the *measurement of electrical resistance* and the *electrical strength (withstand voltage) test* (by one-minute power frequency voltage). The methods of these tests are given in the third section of this tutorial (see subsection 3.5).

Load testing. These tests contain a whole series of tests at the nominal parameters of input and output voltage and load current. This is, firstly, a temperature-rise test (see subsection 5.1). In addition, the following test types refer to the load testing.

Check of the apparatus functioning. The test is carried out in order to assess the operability of the elements included by the apparatus; in particular, control, regulation and diagnostic systems, signaling devices, built-in measuring devices, protection devices and cooling systems. The device is considered to have passed the test if the operation of the above-mentioned devices and systems comply with standards and Specs.

Найбільш суттєвими властивостями СНПП є їх здатність здійснювати бездугову комутацію електричних кіл, а також забезпечити високу швидкодію та частоту спрацьовування апарата, його надійність, підвищений ресурс та низькі експлуатаційні витрати. Отже, у наш час СНПП широко використовуються також для побудови силових комутаційних апаратів, які поряд з функцією комутації кіл можуть виконувати регулювання середніх значень струму та напруги, що має велике значення при їх використанні у системах автоматизованого електроприводу. Такі апарати здійснюють не тільки пуск та зупинення асинхронних двигунів, але й плавне регулювання швидкості їх обертання та гальмування без використання спеціальних пускорегулювальних пристроїв.

Не можна не відзначити також використання СНПП для побудови перетворювачів та комутаційних апаратів високої напруги.

Слід зазначити, що СНПП та модулі є найбільш слабкою ланкою силових електронних апаратів, що обмежує область їх використання і визначає певні особливості програм та методів їх електричних випробувань. Проте, окремі види електричних випробувань силових електронних апаратів за своєю методикою практично нічим не відрізняються від аналогічних випробувань електричних апаратів. Відповідно до стандартів та ТУ на певні види, силові електронні апарати піддаються наступним видам електричних випробувань [36, 37]:

Випробування електричної ізоляції. Основними видами випробувань ізоляції силових електронних апаратів низької напруги є *вимірювання електричного опору* та *випробування електричної міцності* (однохвилинною напругою промислової частоти). Методи цих випробувань надані у третьому розділі цього посібника.

Навантажувальні випробування. Містять у собі цілу низку випробувань при номінальних параметрах вхідної та вихідної напруги та струму навантаження. Це, по перше, *випробування на нагрів* (див. підрозділ 5.1). Крім того, до навантажувальних випробувань відносяться наступні їх види.

Перевірка функціонування апарата. Випробування проводять з метою оцінки працездатності елементів, які містить апарат. Зокрема, систем керування, регулювання та діагностики, пристроїв сигналізації, вбудованих вимірювальних пристроїв, пристроїв захисту та систем охолодження. Апарат вважають таким, що витримав випробування, якщо дія вищеназваних пристроїв та систем відповідає вимогам стандартів та ТУ.

Check of the current and voltage distribution in PSCD. It is well known that in order to construct high-power electronic apparatus, as well as to increase their reliable functioning, group (series and parallel) connection of PSCD is extensively used. Due to the fact that semiconductor devices has non-identical volt-ampere characteristics, individual devices will be subjected current overload, when they connected in parallel, and overvoltage, when they connected in series. Therefore, the purpose of these tests is to check the distribution of current and voltage, respectively, in parallel and series connected PSCDs, as well as to determine the coefficient of uneven distribution, respectively, of currents and voltages.

Checking the current distribution through parallel-connected PSCDs is carried out by the method of direct evaluation of currents: the currents in each branch containing parallel-connected PSCDs are measured with the same device. It should be noted that this checking technique has certain difficulties associated with the need to install measuring devices into the circuits of PSCDs that can disrupt the current distribution in the branches. Therefore, in practice, this technique is used only in conducting qualification and type tests.

In operation and conducting periodic tests, the current distribution is determined by measuring the voltage drop across the PSCD; the tests are carried out in the short-circuit condition. It should be pointed out here that PSCD is usually selected providing the equal distribution of direct voltage drops at the rated current.

In compliance with the Specs for specific types of apparatus, the magnitude of the current distribution non-uniformity coefficient in percent for each parallel-connected PSCD is determined by the following formula:

$$K_I = \frac{n \cdot I_F - I_{F\Sigma}}{I_{F\Sigma}} \cdot 100\%,$$

where I_F is the current through the PSCD under test, A; n is the number of parallel-connected PSCDs; $I_{F\Sigma}$ is the total current through parallel-connected PSCDs.

Checking the voltage distribution across series-connected PSCDs is carried out by the method of direct evaluation of instantaneous voltage values. In preparation for the tests, an oscilloscope is connected to the anode and cathode of the PSCD. During the tests, the reverse or forward voltage is measured on each series-connected device.

Перевірка розподілу струму та напруги СНПП. Добре відомо, що для побудови силових електронних апаратів великої потужності, а також підвищення їх надійного функціонування широко використовують групове (послідовне та паралельне) з'єднання СНПП. Внаслідок неідентичності їх вольт-амперних характеристик окремі прилади при паралельному з'єднанні піддаються перевантаженням по струму, а при послідовному – по напрузі. Отже, метою цих випробувань є перевірка розподілу струму та напруги, відповідно, по паралельно та послідовно з'єднаним СНПП, а також визначення коефіцієнту нерівномірності розподілу, відповідно, струмів та напруг.

Перевірку розподілу струму по паралельно з'єднаним СНПП здійснюють методом безпосередньої оцінки струмів: одним й тим же приладом вимірюють струми у кожній гілці, що містить паралельно з'єднані СНПП. Слід відзначити, що цей спосіб перевірки має певні труднощі, пов'язані з необхідністю встановлювати вимірювальні прилади у кола напівпровідникових приладів, що може порушити розподіл струму по гілкам. Тому на практиці цей спосіб використовують тільки при кваліфікаційних та типових випробуваннях.

При експлуатації та періодичних випробуваннях розподіл струму визначають шляхом вимірювання напруги на СНПП; ці випробування проводять у режимі короткого замикання. При цьому слід зазначити, що самі прилади підбирають, як правило, за рівним розподілом прямих падінь напруги при номінальному струмі.

Відповідно до ТУ на конкретні типи апаратів, значення коефіцієнту нерівномірності розподілу струму в процентах по кожному паралельно з'єднаному СНПП визначається за наступною формулою:

$$K_I = \frac{n \cdot I_F - I_{F\Sigma}}{I_{F\Sigma}} \cdot 100\%,$$

де I_F – струм через СНПП, що перевіряється, А; n – кількість паралельно з'єднаних СНПП; $I_{F\Sigma}$ – сумарний струм через паралельно з'єднані СНПП.

Перевірку розподілу напруги по послідовно з'єднаним СНПП здійснюють методом безпосередньої оцінки миттєвих значень напруг. При підготовці до випробувань до аноду та катоду СНПП підключають осцилограф. В процесі випробувань вимірюють зворотну або пряму напругу на кожному послідовно з'єднаному приладі.

The non-uniformity coefficient of the voltage distribution in percentages across series-connected PSCDs is determined by the following formula:

$$K_U = \frac{n \cdot U_R - U_{R\Sigma}}{U_{R\Sigma}} \cdot 100\%,$$

where U_R is the reverse (direct) voltage drop across the PSCD, V; n is the number of series-connected PSCDs; $U_{R\Sigma}$ is the total reverse (forward) voltage drop across series-connected PSCDs.

The apparatus is considered to have passed the test if the magnitudes of currents and voltages, respectively, through the parallel-connected and across each series-connected PSCD are within the range of normalized magnitudes, and the corresponding non-uniformity coefficients of current and voltage distribution do not exceed the normalized value.

Determination of efficiency. The test is carried out by the method of direct evaluation of the input and output power of the apparatus followed by the calculation of the indicator; in compliance with the Specs for devices of specific series and types, the test is also allowed to carry out by the method of determining power losses or by calculation.

After setting the nominal values of the input and output voltage and load current, as time passes a standardized time interval (in compliance with standards and Specs), the power is measured in the input and output circuits. The power consumed by auxiliary devices (fans, automation devices, etc.) is also measured, if they are separately connected to the power supply network. The efficiency value is determined in percent by the following formula

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}} + P_{\text{add}}} \cdot 100\%,$$

where P_{in} is the power measured at the input, W; P_{out} is the power measured at the output, W; P_{add} is power consumed by auxiliary devices, W.

In testing of powerful converters, the measurements are carried out in no-load and short-circuit conditions. The no-load condition is set at the nominal input voltage at the current sufficient for the complete operation of all protective circuits (usually 5–10 A). In this case, the efficiency is determined by the following formula:

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{sc}} + P_{\text{nl}} + P_{\text{add}}} \cdot 100\%,$$

Коефіцієнт нерівномірності розподілу напруги в процентах на послідовно з'єднаних СНПП визначається за наступною формулою:

$$K_U = \frac{n \cdot U_R - U_{R\Sigma}}{U_{R\Sigma}} \cdot 100\%,$$

де U_R – зворотне (пряме) падіння напруги на СНПП, В; n – кількість послідовно з'єднаних СНПП; $U_{R\Sigma}$ – сумарне зворотне (пряме) падіння напруги на послідовно з'єднаних СНПП.

Апарат вважають таким, що витривав випробування, якщо значення струмів та напруг, відповідно, через паралельно з'єднані та на кожному послідовно з'єднаному СНПП знаходяться у діапазоні нормованих значень, а відповідні коефіцієнти нерівномірності розподілу струму та напруги не перевищують нормованого значення.

Визначення ККД. Випробування проводять методом безпосередньої оцінки вхідної та вихідної потужності апарата з наступним обчисленням показника; відповідно до ТУ на апарати конкретних серій та типів, випробування допускається також проводити методом визначення втраченої потужності або розрахунком.

Після установки номінальних значень вхідної і вихідної напруги та струму навантаження через нормований проміжок часу відповідно стандартів та ТУ проводять вимірювання потужності у вхідному та вихідному колах. Вимірюють також потужність, що споживають допоміжні пристрої (вентилятори, пристрої автоматики та ін.), якщо вони окремо приєднані до мережі живлення. Значення ККД визначається в процентах за наступною формулою

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}} + P_{\text{add}}} \cdot 100\%,$$

де P_{in} – потужність, що виміряна на вході, Вт; P_{out} – потужність, що виміряна на виході, Вт; P_{add} – потужність, що споживається допоміжними пристроями.

При випробуванні потужних перетворювачів вимірювання проводять в режимах неробочого ходу та короткого замикання. Режим неробочого ходу встановлюють при номінальній вхідній напрузі при струмі, достатнім для повноцінної роботи всіх захисних ланцюгів (за звичаєм від 5 до 10 А). У цьому випадку ККД визначається за наступною формулою:

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{sc}} + P_{\text{nl}} + P_{\text{add}}} \cdot 100\%,$$

where P_{sc} is the power consumed in the short-circuit condition at rated current, W; P_{nl} is the power losses in the auxiliary protective components of the converter at a current of $I \leq 5 \div 10$ A, W.

In usual practice, efficiency is measured when conducting load tests at nominal parameters of input and output voltage and load current, in particular, temperature-rise test.

The apparatus is considered to have passed the test if the efficiency value is equal to or exceeds the standard value.

Temporary overvoltage test. The main purpose of the test is to determine the operability of the protection devices of internal circuits against sort-term action of increased voltage. The increased voltage can be generated in various techniques depending on the requirements of the Specs for apparatus of specific series and types, namely, by internal switching of the apparatus electrical circuits; by interrupting the converting transformer; by interrupting active-inductive load; by short-term applying the increased or impulse voltage on the apparatus input.

To conduct the test, normalized values of input and output voltage and load current are adjusted and an increased voltage is applied. In the test process, using an electron-beam oscilloscope or a digital recording device, instantaneous voltage values are measured at the apparatus control points predetermined in the test program.

The apparatus is considered to have passed the test if the voltage values at the control points do not exceed the permissible values.

Over-current capability test. The main purpose of the test is to determine the device operability under the effect of overload (over-current) during a standardized time interval and after its effect.

To conduct the test, the load current value, equal to the nominal value, is set. Then the current is increased to the rated overload value; after laps of the normalized time interval, the current decreases and the output voltage is measured. During the test, in compliance with the Specs for specific series and types of apparatus, automatic de-energizing the apparatus and (or) actuation of alarms and protection devices is observed. After that, the apparatus is energized to the nominal load and the output voltage is measured. The temperature of the PSCD casings and other components are require checked. After the test, a visual inspection of the apparatus is carried out.

де P_{sc} – потужність, що споживається в режимі КЗ при номінальному струмі, Вт; P_{nl} – потужність втрат в допоміжних захисних елементах перетворювача при струмі $I \leq 5 \div 10$ А, Вт.

За звичаєм вимірювання ККД суміщають з навантажувальними випробуваннями при номінальних параметрах вхідної та вихідної напруги та струму навантаження, зокрема випробуванням на нагрів.

Апарат вважають таким, що витримав випробування, якщо значення ККД дорівнює нормованому значенню або перевищує його.

Випробування на короткочасну дію підвищеної напруги. Основною метою випробування є визначення працездатності пристроїв захисту внутрішніх кіл від дії підвищеної напруги. Підвищена напруга може бути утворена різними способами в залежності від вимог ТУ на апарати конкретних серій та видів, а саме: внутрішньою комутацією електричних кіл апарата; вимкненням перетворювального трансформатора; вимкненням активно-індуктивного навантаження; короткочасною дією підвищеної або імпульсної напруги на вхід апарата.

Для проведення випробування, установлюються нормовані значення вхідної й вихідної напруги та струму навантаження і створюється підвищена напруга. В процесі випробувань, за допомогою електронно-променевого осцилографу або цифрового реєструвального пристрою здійснюється вимірювання миттєвих значень напруги в контрольних точках апарата, які надані у програмі випробувань.

Апарат вважають таким, що витримав випробування, якщо значення напруг у контрольних точках не перевищують допустимих величин.

Випробування на короткочасну дію перевантаження. Основною метою випробування є визначення працездатності апарата під впливом перевантаження впродовж нормованого інтервалу часу та після дії перевантаження.

Для проведення випробування, установлюється значення струму навантаження, яке дорівнює номінальній величині. Потім струм підвищується до нормованого значення перевантаження; після закінчення нормованого інтервалу часу струм знижуються і вимірюється вихідна напруга. Відповідно до ТУ на конкретні серії та типи апаратів, в процесі випробувань спостерігаються автоматичне вимкнення апарата та (або) спрацьовування сигналізації та пристроїв захисту. Після цього апарат вмикається на номінальне навантаження і вимірюється вихідна напруга. Обов'язково перевіряється температура корпусу СНПП та інших елементів. Після проведення випробування проводиться зовнішній огляд апарата.

The device is considered to have passed the test, if during the visual inspection, no unacceptable deformations in the power circuit are found, and the value of the output voltage corresponds to the standardized value.

Short circuit testing. The short-circuit condition is unacceptable for power electronic apparatus because it leads to damage of the PSCDs; for their protection, quick-operated devices are used, such as circuit-breakers and fuses. The main tasks of the test are to check the operation of protection and signaling devices, as well as the ability to save operability of the apparatus after a short-circuit current effect.

There distinguished internal short-circuits, when the shorting occurs in the internal circuits of the apparatus, and external short-circuits, when the shorting occurs in external circuits in relation to the apparatus. Accordingly, this type of testing includes *internal short-circuit test* and *external short-circuit test*.

When preparing the tests, a short-circuiter (or other device) and a measuring device are connected to control points of the internal (external) circuits of the apparatus to monitor the voltage and record the instantaneous value of the short-circuit current (see subsection 2.5). The power source must provide a voltage that corresponds to the nominal value of the apparatus under test, as well as the specified value of the short-circuit current.

The tests are carried out in the following order. First, the nominal values of the input and output voltages and load current are adjusted and the measured parameters are recorded at the control points. Then the short-circuiter (or other device) is closed and the measured parameters are recorded at the control points. In the process, actuation of the alarm and protection, i.e. automatic shutdown of the apparatus (or shorted circuit), is observed. After that, a visual inspection is carried out, actuated fuse is substituted (or a circuit-breaker is closed) and the output voltage is measured. The number of short-circuit tests and the interval between them are established in compliance with the requirements of the Specs for certain series and types of apparatus.

The apparatus is considered to have passed the test under the following conditions:

- as result of the external inspection, no violations of the standardized requirements regarding deformations of power circuits were found;
- the values of the measured parameters at the control points of the internal (external) circuits correspond to the normalized values;

Апарат вважають таким, що витримав випробування, якщо при зовнішньому огляді не знайдено недопустимих деформацій силового кола та значення вихідної напруги відповідає нормованому значенню.

Випробування на стійкість до коротких замикань. Режим короткого замикання (КЗ) є неприпустимим для силових електронних апаратів оскільки веде до пошкодження СНПП; для їх захисту використовуються швидкодіючі апарати: вимикачі та запобіжники. Основними задачами випробування є перевірка спрацьовування пристроїв захисту та сигналізації, а також збереження працездатності апарата після дії струму КЗ.

Розрізняють внутрішні КЗ, коли замикання відбувається у внутрішніх колах апарата, та зовнішні (наскрізні) КЗ, коли замикання відбувається у зовнішніх колах по відношенню до апарата. Відповідно, даний вид випробувань містить *випробування на стійкість до внутрішніх КЗ* та *випробування на стійкість до зовнішніх КЗ*.

При підготовці до випробувань в контрольних точках внутрішніх (зовнішніх) кіл апарата підключають короткозамикач (або інший пристрій) та вимірювальний пристрій для контролю напруги та реєстрації миттєвого значення струму КЗ (див. підрозділ 2.5). Джерело живлення повинно забезпечити напругу, яка відповідає номінальному значенню випробуваного апарата, а також нормованому значенню струму КЗ.

Випробування проводять у наступному порядку. Спочатку установлюються номінальні значення вхідної й вихідної напруг та струму навантаження і реєструються вимірювані параметри у контрольних точках. Потім вмикається короткозамикач (або інший пристрій), реєструються вимірювані параметри у контрольних точках. При цьому, спостерігається спрацьовування сигналізації та захисту, тобто автоматичне відключення апарата (або короткозамкненого кола). Після цього, проводять зовнішній огляд, заміну відпрацьованого запобіжника (або вмикання автоматичного вимикача) та вимірювання вихідної напруги. Кількість випробувань КЗ та інтервал між ними встановлюються відповідно до вимог ТУ на певні серії та типи апаратів.

Апарат вважають таким, що витримав випробування, за наступних умов:

- при зовнішньому огляді не виявлено порушень нормованих вимог щодо деформацій силових кіл;
- значення вимірюваних параметрів в контрольних точках внутрішніх (зовнішніх) кіл відповідають нормованим значенням;

- the action of protection and alarm meets the established requirements;
- the output voltage after the test complies with the normalized value.

It should be noted that in compliance with standards [36, 37] and Specs for certain series and types, power electronic apparatus are subjected to many other types of electrical tests. However, they have a specific character, so they are not considered in the educational process.

5.5 Non-electrical Checks and Tests

The reliable functioning of electrical and power electronic apparatus is significantly determined by the operability and reliability of their constructive components (details and units) and construction as whole. Furthermore, the apparatus should be able to save its operability and reliability under exposure of external factors. Reliable functioning and reliability under external exposures is especially important for electromechanical apparatus, in particular for the components of their kinematics. Because of this, research and testing as for determine the non-electrical parameters are a vital important problem that are solved in the process of their development, production and operation.

Non-electrical tests usually include *visual inspection* and check for *compliance with assembly drawing*, *mechanical life test*, testing for *vibration-stability* and *impact-resistance*, environmental exposure tests (*climatic tests*, testing for *exposure of mechanical factors*, testing for *transportation durability*), tests of *casings*, etc.

Visual inspection and check for compliance with assembly drawing. It is made usually in approval testing. Visual inspection usually includes the following checks:

- the absence of the damages;
- the state of terminations of the windings and their marking;
- the availability and safety of the seals;
- the state of the grounding surface and its marking;
- the state of the protective coats of the outdoor parts;
- the availability of the rating plate and its data correctness;
- completeness of the apparatus and so forth according to the apparatus type.

- дія захисту та сигналізації відповідає встановленим вимогам;
- вихідна напруга після випробування відповідає нормованому значенню.

Слід зазначити, відповідно до стандартів [36, 37] та ТУ на конкретні види та типи, силові електронні апарати піддаються багатьом іншим видам електричних випробувань. Проте, вони мають специфічний характер, отже не розглядаються у навчальному процесі.

5.5 Неелектричні перевірки та випробування

Надійне функціонування електричних та електронних апаратів багато в чому визначається працездатністю та надійністю їх конструктивних елементів (деталей та вузлів) та конструкції у цілому, а також здатністю зберігати працездатність та надійність при зовнішніх впливах. Для електромеханічних апаратів важливим є надійне функціонування та стійкість до зовнішніх дій елементів їх кінематики. Отже дослідження та випробування щодо визначення неелектричних параметрів електричних та електронних апаратів є важливою складовою задачею, що вирішуються в процесі їх розробки, виробництва та експлуатації.

До неелектричних випробувань зазвичай відносять *зовнішній огляд та перевірка на відповідність вимогам складального креслення*, *випробування на механічну зносостійкість*, *випробування на вібростійкість і удароміцність*, *випробування на дію зовнішніх факторів (кліматичні випробування, випробування на дію механічних зовнішніх факторів, випробування на міцність при транспортуванні)*, *випробування оболонок (корпусів)*, тощо.

Зовнішній огляд та перевірка на відповідність вимогам складального креслення проводиться, як правило, при приймально-здавальних випробуваннях. Зовнішній огляд зазвичай проводять візуально; зазвичай перевіряють:

- відсутність ушкоджень;
- стан виводів обмоток та їх маркування;
- наявність та цілісність пломбування;
- стан поверхні площадки для заземлення та її маркування;
- стан захисних покриттів зовнішніх частин;
- наявність таблички та правильність її заповнення;
- комплектність апарату тощо, залежно від типу апарату.

Verification for compliance with the requirements of the assembly drawing usually includes checking the overall and mounting dimensions with the help of measuring tools or gauges, as well as the apparatus mass by the way of weighing.

Mechanical endurance test. This test is typical for electromechanical apparatuses and is usually performed in periodic and type testing, as well as various kinds of studies. This test is one of the most long-term ones, but it should be noted that from the standpoint of the procedure and equipment to be used it does not involve in heavy problems.

Before the test, the apparatus undergoes a technical inspection; the follow-through and pressure of its main and auxiliary contacts are measured. To perform the test, the apparatus is installed into operating position. In testing, a given number of open-close operations is performed with a given frequency in the absence of a current load. The frequency and total number of the cycles must comply with the nameplate parameters of the apparatus. Once the apparatus has performed the required number of open-close operations, it is subjected to visual inspection, adjustment and replacement of a certain units (if it is permitted by instruction manual).

Close-open operations of the apparatus in testing is performed using its driving device, which receives appropriate signals at the specified frequency. In the case when the apparatus is hand-operated, an appliance simulating the hand control is usually used. The number of completed close-open operations is determined using a relevant counter. As already mentioned, mechanical endurance test is quite long in time. In order to make its calendar period shorter, the test is usually conducted around the clock. Therefore, in test process, it is necessary to ensure monitoring the state of the device with recording of failures in operation and disconnection from the control circuit in case of failure.

The results of the mechanical endurance test are considered positive under the following conditions:

1. The apparatus has provided the number of cycles required by the Specs without failures in execution of close-open operations due to seizing or damage to the moving parts of the mechanism.

2. Once the apparatus has performed the specified number of switching cycles, there was not detected slackening threaded and permanent joints, break-down or inadmissible strains of individual elements, etc.

Перевірка на відповідність вимогам складального креслення зазвичай включає перевірку габаритних, настановних та приєднувальних розмірів за допомогою мірального інструменту або шаблонів, а також маси апарату шляхом зважування.

Випробування механічної зносостійкості. Цей вид випробувань є характерним для електромеханічних апаратів і проводиться, як правило, при типових та періодичних випробуваннях, а також відповідних дослідженнях. Це один із найбільш тривалих видів випробувань, але слід зазначити, що за своїм змістом та методикою проведення цей вид випробувань не являє собою значних проблем.

Перед випробуванням апарат піддається технічному огляду, перевіряється провал та натиснення головних та допоміжних контактів. Для випробувань апарат встановлюється у робоче положення. В процесі випробувань з заданою частотою здійснюється задана кількість циклів «вмикання-вимикання» при відсутності струмового навантаження. Частота та загальна кількість циклів повинні відповідати паспортним параметрам апарата. Через певну кількість циклів апарат піддається технічному огляду, регулюванню та заміні окремих вузлів (якщо це передбачено експлуатаційною документацією).

Вмикання та вимикання апарата в процесі випробувань здійснюється за допомогою приводу апарата, на який з зазначеною частотою подаються відповідні сигнали. У випадку ручного керування апарата, за звичаєм використовують пристрій, що відтворює ручне керування. Число виконаних комутаційних циклів визначається за допомогою відповідного лічильника. Як вже зазначалось, випробування на механічну зносостійкість є досить тривалими; для скорочення календарного терміну, випробування за звичаєм проводять цілодобово. Отже, при цьому слід забезпечити автоматичний контроль стану апарата з фіксацією відмов у роботі і відключення у разі відмови від схеми керування.

Результати випробування на механічну зносостійкість вважається позитивними за наступних умов:

1. Апарат забезпечив необхідну за ТУ кількість циклів без відмов при вмиканні або вимиканні внаслідок заклинювання або пошкодження рухомих частин механізму.

2. Після виконання заданої кількості комутаційних циклів не відбулось: послаблення різьбових і нероз'ємних з'єднань, поломки або неприпустимих деформацій окремих елементів тощо.

3. The apparatus passed other test types, namely switching tests, electromechanical tests, temperature-rise test at rated current, etc., in compliance with the requirements of the standards and Specs for the apparatus.

If the results of the mechanical endurance test are positive, the test is usually continued to determine the ultimate mechanical life of the apparatus and obtain statistical data about its failures.

Climatic tests. As already mentioned, climatic conditions significantly affect the functioning of electrical and power electronic devices (see subsection 1.6), but this problem is not yet sufficiently developed from a scientific standpoint. Therefore, the only climatic tests can be criterion of reliable and long-time operation of devices. It should be noted that the destruction of the material under the exposure of different climatic conditions has a complex physical-and-chemical and long-term behavior, therefore, accelerated test methods are developed for the appropriate combinations of climatic factors. In some cases, test stations directly in countries with a suitable climate are necessary to build, although testing in natural conditions requires large costs. These costs deserve that to get research material.

The tests enable us to ascertain the state of the device after a certain time of its being in an artificial environment or to monitor its state at certain time intervals throughout the duration of the tests. The most important thing is to know how the state of the device has changed, but not its state at a specific moment. Changes in device properties can be of two types: reversible and irreversible. If the state of the apparatus changes only during the effect of the factor, and its state is fully restored after the termination of the effect, then such changes are reversible. Irreversible changes remain at least partially after the termination of the climatic factor exposure. Climatic tests are of interest in term of both reversible and irreversible changes. Reversible changes are more related to the accident rate of electrical equipment, while irreversible ones are related to its service life.

Thus, climatic testing represent a complex of tests that usually characterizes the exposure of one of the climatic factors on the state of the apparatus. The specific content of the tests is determined by the requirements of standards and Specs for specific types of apparatus or by agreement with the customer. Let us consider the main types of climatic tests of electrical and power electronic devices in accordance with the Ukrainian national standard [13]:

3. Апарат витримав інші види випробувань, а саме комутаційні, електромеханічні, на нагрів при номінальному струмі тощо, відповідно до вимог стандартів та ТУ на апарат.

При позитивних результатах випробувань механічної зносостійкості, зазвичай продовжують випробування щодо визначення повного ресурсу апарата і набору статистичних даних про відмови.

Кліматичні випробування. Як вже зазначалось, кліматичні умови суттєво впливають на функціонування електричних та електронних апаратів (див. підрозділ 1.6), але у науковому плані це питання наразі ще недостатньо розроблене. Отже критерієм надійної та довготривалої роботи апаратів є кліматичні випробування. Слід зазначити, що руйнування матеріалу під впливом різних кліматичних умов носять складний фізико-хімічний та довготривалий характер, тому розробляються прискорені методи випробувань для відповідних поєднань кліматичних чинників. У деяких випадках доводиться будувати випробувальні станції безпосередньо в країнах з відповідним кліматом, хоча випробування в природних умовах потребують великих витрат. На них доводиться йти, щоб здобути дослідний матеріал.

Випробування дають можливість встановити стан апарата через певний час перебування у штучному середовищі або стежити за його станом через певні інтервали часу протягом усього часу випробувань. Найбільш важливим є знати наскільки змінився стан апарату, а не його стан у конкретний момент. Зміни властивостей апарата можуть бути двох типів: зворотні та незворотні. Якщо стан апарата змінюється лише на час дії чинника, а після припинення його дії стан повністю відновлюється, такі зміни є зворотними. Незворотні зміни залишаються хоча б частково після припинення дії кліматичного фактору. При кліматичних випробуваннях інтерес становлять як зворотні, так і незворотні зміни. Зворотні зміни більше пов'язані з аварійністю електроустаткування, а незворотні – з терміном його служби.

Таким чином, кліматичні випробування являють собою комплекс випробувань, який характеризує, як правило, вплив на стан апарата одного з кліматичних факторів. Конкретний зміст випробувань визначається вимогами стандартів та ТУ на конкретні види апаратів або за погодженням із замовником. Розглянемо основні види кліматичних випробувань електричних та електронних апаратів відповідно до національного стандарту України [13].

Heat resistance tests are carried out for the purpose to check temperature exposures on the parameters of the device, as well as its visual appearance. Heat resistance tests usually include:

- *test for resistance to exposure of uppermost and lowermost values of ambient temperature* during operation, transportation and storage;
- *test for resistance to change in ambient temperature* in the range of the lower and upper values.

Test for resistance to air humidity exposure are carried out in order to check the ability of the device to maintain its parameters under conditions of long-term exposure to heightened humidity. In tropical climates, increased humidity usually acts together with increased temperature. This situation must be taken into account during testing.

Test for resistance to solar radiation exposure are carried out in order to check the ability of the device and/or its individual parts and assemblies to save its visual appearance and parameters after exposure to solar radiation.

Devices are usually irradiated by combined source of electromagnetic emission. Its spectral composition must correspond to solar emission, but it is very difficult to obtain the spectrum of the sun, even under the most careful selection of sources. The spectrum of ultraviolet emission should be within 290–400 nm; the integral heat flux of emission should be 1120 W/m², including the flux of the ultraviolet part of the spectrum of 68 W/m² [13]. The ultraviolet part of artificial solar radiation is usually provided using xenon gas discharge or coal arc lamps; visible part – ordinary incandescent lamps; infrared – various types of heaters.

The apparatus is placed on a rotary table that rotates around a vertical axis with a period of 24 hours. The duration of irradiation is usually about 120 hours. After the test, a visual inspection of the device is carried out and certain parameters are measured. The device is consider as passed the test if it meets the requirements.

Tests for dust exposure usually includes three types of tests:

- *test of resistance to the dust (sand) static exposure*, which is carried out in order to detect the ability of the device to maintain its parameters in an environment with an increased dust content;

Випробування на теплостійкість проводять з метою перевірки температурних дій на параметри апарата, а також його зовнішній вигляд. Випробування на теплостійкість, як правило містять у собі:

- *випробування на тривкість до дії верхнього та нижнього значень температури* навколишнього середовища під час експлуатації, транспортування та зберігання;

- *випробування на тривкість до зміни температури* довкілля в межах нижнього та верхнього значень.

Випробування на тривкість до дії вологості повітря проводять з метою перевірки здатності апарата зберігати свої параметри в умовах тривалого впливу підвищеної вологості. В умовах тропічного клімату підвищена вологість, як правило, діє разом із підвищеною температурою, що потрібно враховувати під час випробувань.

Випробування на тривкість до дії сонячного випромінювання проводять з метою перевірки здібності апарата та/або їх окремих деталей та вузлів до збереження зовнішнього вигляду та параметрів після дії сонячної радіації.

Опромінення апаратів здійснюється, як правило, комбінованим джерелом електромагнітного випромінювання. Його спектральний склад повинен відповідати сонячному випромінюванню, проте отримати спектр сонця дуже складно, навіть за найретельнішого підбору джерел. Спектр ультрафіолетового випромінювання має бути у межах 290–400 нм; інтегральна щільність теплового потоку випромінювання повинна становити 1120 Вт/м^2 , у тому числі щільність потоку ультрафіолетової частини спектру 68 Вт/м^2 [13]. Ультрафіолетову частину штучної сонячної радіації забезпечують, як правило, ксенонові газорозрядні або вугільні дугові лампи; видимої частини – звичайні лампи розжарювання; інфрачервону – різного типу нагрівачі.

Апарат розміщується на поворотному столі, що обертається навколо вертикальної осі з періодом 24 години. Тривалість опромінення складає, як правило, порядку 120 годин. Після закінчення випробування проводять зовнішній огляд апарата та вимірюють певні параметри. Апарат вважається таким, що витримав випробування, якщо він задовольняє вимогам.

Випробування на дію пилу містить у собі як правило три види випробувань:

- *випробування тривкість до статичної дії пилу (піску)*, яке проводиться з метою виявлення здатності апарату зберігати свої параметри у середовищі з підвищеним вмістом пилу;

- *test for resistance to the dust (sand) dynamic exposure*, which is carried out in order to check the resistance of devices to the destructive (abrasive) action of dust; in this case, the test is conducted by blowing the device with a dried dust mixture, which usually contains 70% quartz sand, 15% chalk, and 15% kaolin in an amount equal to approximately 0.1% of the chamber volume, at a speed of 10–15 m/s during one hour;

- *test for resistance to dust ingress*, which is carried out in order to check the ability of the device casing to keep dust out; in this case, the device is exposed to the dust mixture, which is in a suspension state in the chamber for 15 minutes at an air circulation speed of 0.5–2 m/s; then dust exposes without air circulation for 30 minutes; the dust mixture in this case should contain approximately 25% fluorescent powder (for example, phosphor) and 75% quartz sand; the device is considered to have passed the test if no dust is detected inside its casing, which is usually detected by exposure to ultraviolet light.

Test for the salt fog exposure is carried out in order to determine the corrosion resistance of the device structure in an atmosphere saturated with aqueous solutions of salts. During the test, the device is exposed to salt fog in a special chamber with a certain temperature. The fog is formed by spraying with a centrifugal aerosol device or a sprayer of an aqueous solution of table salt in amount of 33 ± 3 g/l. The solution is sprayed for 15 minutes every 45 minutes. The total time of the test is usually from 2 to 10 days. After completion of the test, the device should save its visual appearance.

It should be noted that electrical and electronic devices are also subjected to other types of climatic tests:

- rain resistance test;
- *test for resistance to the action of reduced atmospheric pressure* and its rapid change;
- *test for operability during icing*, and other test types [13, 30].

When conducting climatic tests, a wide variety of equipment is used, according to the type of tests. First, these are climatic chambers: *thermostats* (heat, cold), *hygrostats* (humidity), solar radiation chambers, chambers for testing in conditions of pollution and dust, chambers for the formation of salt fog, artificial rain equipment, etc.

- *випробування на тривкість до динамічної дії пилу (піску)*, яке проводять з метою перевірки стійкості апаратів до руйнівної (абразивної) дії пилу; у цьому випадку випробування проводять обдуванням апарата просушеною пиловою сумішшю, яка за звичаєм містить 70% кварцового піску, 15% крейди та 15% каоліну у кількості, що дорівнює приблизно 0,1% від об'єму камери, зі швидкістю 10–15 м/с протягом 1 години;

- *випробування на тривкість до пилонепроникності*, яке проводять з метою перевірки здатності корпусу апарата не пропускати пил; у цьому випадку апарат піддається дії пилової суміші, що знаходиться у зведеному стані у камері протягом 15 хвилин при швидкості циркуляції повітря 0,5–2 м/с; потім протягом 30 хвилин відбувається осідання пилу без циркуляції повітря; пилова суміш у цьому випадку має містити приблизно 25% флуоресцентного порошку (наприклад, люмінофора), та 75% кварцового піску; апарат вважається таким, що витримав випробування, якщо всередині його оболонки не виявлено пилу, який за звичаєм виявляється опроміненням ультрафіолетовим світлом.

Випробування на вплив соляного туману проводять з метою визначення корозійної стійкості конструкції апарата в атмосфері насиченої водними розчинами солей. В процесі випробування апарат піддається дії соляного туману у спеціальній камері з певною температурою. Туман утворюється розпиленням відцентровим аерозольним апаратом або пульверизатором водного розчину повареної солі у кількості 33 ± 3 г/л. Розпорошення розчину здійснюють упродовж 15 хвилин через кожні 45 хвилин. Загальний час випробувань за звичаєм складає від 2 до 10 діб. Після завершення випробування, апарат має зберегти свій зовнішній вигляд.

Слід зазначити, що електричні та електронні апарати піддаються також іншим видам кліматичним випробувань:

- *випробування на тривкість до дії дощу*;
- *випробування на тривкість до дії зниженого атмосферного тиску та швидкої його зміни*
- *випробування на працездатність під час ожеледі та інші види випробувань*. [13, 30].

При проведенні кліматичних випробувань застосовується велике різноманіття обладнання, відповідно до виду випробувань. По-перше, це кліматичні камери: *термостати* (тепла, холоду), *гігростати* (вологості), камери сонячного випромінювання, камери для випробувань в умовах забруднення та запилення, камери для утворення соляного туману, дощувальні установки тощо.

Tests for external mechanical actions. As already mentioned, destabilizing factors that significantly affect the functioning of electrical and power electronic apparatus can be caused by external mechanical exertions: vibrations, shocks, bumps, wind load, etc. (see subsection 1.6). It should be noted that tests for external mechanical actions represent a wide variety of tests associated, as a rule, with the action of individual factors [30]. Let's consider the most significant ones.

Vibration-stability and impact-resistance tests. The necessity of these tests are caused by the possibility of operation of electric and power electronic apparatus in specific conditions, such as near to powerful presses, hammers, in transporting facilities (auto, railway, airway, seaway). The main test equipment in these cases are correspondingly *vibration-testing machine*, producing the sine vibrations in horizontal and vertical planes, and *impact stand* allowing to produce acceleration up to 2g with a frequency up to 80 impacts per minute and an amplitude up to 10 mm.

To perform vibration stability test, the apparatus is installed in its operating position on a vibration stand. The test is subdivided into *pretest* and *main* one. The purpose of the pretest is to check out the absence of resonance. If it is detected, then the resonant frequency is determined, and the test is performed during 30 minutes at the resonant frequency. If the resonance is not detected, the test is continued during one hour alternately in open and closed positions in three orthogonally related directions with an amplitude of 0.35 mm and a frequency of 50 Hz.

Impact-resistance test is performed in operating position of the apparatus during 15 minutes alternately in close and open positions in three orthogonally related directions.

The vibration-stability and impact-resistance tests can be considered successfully completed, if the normal operation of main and auxiliary circuits, drive unit, trips are not disturbed, the malfunctions in the operation of the apparatus mechanism and seizing mounting hardware are not detected.

Airflow test. It is obvious that this type of testing is caused by that in operation outdoor apparatus is exposed by wind loads. The test is conducted to check the ability of the device to perform its functions and to maintain the parameters, specified in the standards and Specs for the device and test procedures, during the action of the airflow.

Випробування на зовнішні механічні дії. Як вже зазначалось, дестабілізуючі чинники, що суттєво впливають на функціонування електричних та електронних апаратів, можуть бути обумовлені зовнішніми механічними діями: вібраціями, ударами, поштовхами, вітровим навантаженням тощо (див. підрозділ 1.6). Слід зазначити, що випробування на зовнішні механічні дії являють собою велике різноманіття випробувань, пов'язаних, як правило, з дією окремих чинників [30]. Розглянемо найбільш суттєві.

Випробування на вібростійкість та удароміцність. Необхідність таких випробувань викликана можливими умовами роботи електричних та електронних апаратів у відповідних умовах: поблизу потужних пресів, молотів, у транспортних засобах (автомобілі, залізничний транспорт, літаки, судна тощо). Основним випробувальним обладнанням у даному випадку відповідно є *вібростенд*, що створює синусоїдальні вібрації у горизонтальній та вертикальній площинах, та *ударний стенд*, який дозволяє набути прискорення до $2g$ з частотою до 80 ударів/хв і амплітудою до 10 мм.

Для проведення випробування на вібростійкість апарат встановлюється на вібростенді у робоче положення. Випробування поділяються на *попередні* та *основні*. Метою попередніх випробувань є перевірка відсутності резонансу. Якщо виявлено резонанс, то визначають резонансну частоту і при резонансній частоті проводять випробування апарата протягом 30 хв. Якщо резонанс не виявлено, то апарат випробовується частотою 50 Гц з амплітудою 0,35 мм протягом години почергово в замкненому та розімкнутому станах у трьох взаємно перпендикулярних напрямках.

Випробування на удароміцність проводять у робочому положенні апарата протягом 15 хв по черзі в увімкненому та вимкненому положеннях у трьох взаємно перпендикулярних напрямках.

Випробування на вібростійкість і удароміцність можна вважати успішно завершеними, якщо не порушилося нормальне функціонування головних і допоміжних кіл, приводу, розчіплювачів, не зазначено збоїв в роботі кінематики й ослаблення кріплення.

Випробування на дію повітряного потоку. Очевидно, що цей вид випробувань обумовлено впливом на апарат (зовнішньої установки) навантажень від вітру в процесі експлуатації. Випробування проводять з метою перевірки здатності апарата виконувати свої функції та зберігати параметри, зазначені в стандартах і ТУ на апарат і програмах випробувань, під час дії повітряного потоку.

The test is usually carried out using an air tunnel, which provides an airflow of a required speed. To conduct test, the alive device is installed in its operating position on a movable platform and is fastened according to the engineering documentation. During the test, the device is blown with an air stream at different angles during 5–10 min.; in the direction of the greatest sail-ness (most cross-sectional area), the blowing duration must be at least 20 minutes. It should be noted that it is allowed to conduct tests by the method of mechanical equivalent or simulation.

The device is considered to have passed the test if mechanical damage is not detected during visual inspection and its parameters meet the requirements established in the standards and Specs.

It should be noted that there are other types of tests for external mechanical actions: *test for the action of linear acceleration*; *acoustic noise test*; *test for seismic impact*, etc. [30]. In particular, for high-voltage devices, tests on the effect of ice and wire gravity are also usually carried out.

Test for strength under transportation. An apparatus that has successfully passed acceptance tests is packaged and then installed in the truck body and fastened. The truck loaded by 20-60% should pass distance 1000 km over a road coated with asphalt at a speed 60 km per hour, or over dirt road more than 250 km at a speed 40 km per hour. The apparatus is considered to have withstood the test if any damages of its constructive components are not detected, as well as the apparatus has withstood acceptance retesting.

Tests of casings. There are two main variations of casings: the ones purposed for operation in explosive medium and not purposed for operation in it. Furthermore, the valid standards state seven degrees for personnel protection against contact with current-carrying parts of the apparatus and nine degrees for the apparatus protection against ingress of moisture. The content and procedure of the tests for casings are significantly different and very specific according to its type. Therefore, there is no point to consider in detail these tests in educational process.

Випробування за звичаєм проводяться на аеродинамічному стенді, який забезпечує повітряний потік заданої швидкості. Для проведення випробувань включений апарат встановлюється у робоче положення та кріпиться на рухомій платформі стенду згідно технічної документації. В процесі випробування апарат обдувається повітряним потоком під різними кутами впродовж 5–10 хв.; у напрямі найбільшої парусності тривалість обдування має бути не менше 20 хв. Слід зазначити, що допускається проводити випробування методом механічного еквівалента або моделюванням.

Апарат вважають таким, що витримав випробування, якщо при візуальному огляді не виявлені механічні пошкодження та його параметри задовольняють вимогам, встановленим у стандартах та ТУ.

Слід зазначити, що існують інші види випробувань на зовнішні механічні дії: *випробування на дію лінійного прискорення; випробування на дію акустичного шуму; випробування на дію сейсмічного удару* і т.д. [30]. Зокрема, для апаратів високої напруги за звичаєм проводяться також випробування на вплив ожеледиці і тяжіння проводів.

Випробування на міцність при транспортуванні. Апарат, що успішно пройшов приймально-здавальні випробування, упаковується, встановлюється в кузов вантажного автомобіля і закріплюється. Автомобіль, завантажений на 20-60%, повинен пройти дорогами з асфальтовим покриттям відстань 1000 км зі швидкістю 60 км/год або по бруківках і ґрунтових дорогах відстань понад 250 км зі швидкістю 40 км/год. Апарат вважають таким, що витримав випробування, якщо не виявлено пошкодження елементів конструкції, і він витримав повторні приймально-здавальні випробування.

Випробування оболонки. Існує два основних види оболонки: оболонки, що призначені для роботи у вибухонебезпечному середовищі і такі, що не призначені для роботи в ній. Відповідно до існуючих норм для оболонки встановлюється сім ступенів захисту персоналу від зіткнення з струмопровідними частинами апарату та дев'ять ступенів захисту апарату від попадання води. Отже методи випробувань оболонки та їх обсяги регламентуються спеціальними вимогами та мають вузько специфічний характер; детально розглядати їх у навчальному процесі немає сенсу.

APPENDIX A

Review Questions

A.1 Questions for Section 1

- A.1.1 What is *scientific-and-research (R&D) work*?
- A.1.2 Name the main methods of *scientific cognition*.
- A.1.3 How do *fundamental research* differ from *applied research*?
- A.1.4 In what are the methods of *deduction* and *induction*?
- A.1.5 How do the methods of *analysis* and *synthesis* differ?
- A.1.6 What is the foundation of *hypothetical method*?
- A.1.7 What does the main aim of experimental research consist?
- A.1.8 What is the purpose to develop the *experimental methodology*?
- A.1.9 What elements does the *experimental plan-program* contain?
- A.1.10 What is the *experimental technique*?
- A.1.11 Name the main tasks of the experiment.
- A.1.12 Name the main stages of *D-work*.
- A.1.13 Define the concept of *experimental designing*.
- A.1.14 What research objects are called “*diffuse*” ones?
- A.1.15 How do *factorial experiments* differ from *extreme experiments*?
- A.1.16 What is a *response function*?
- A.1.17 What is a *regression equation*?
- A.1.18 How does an *active experiment* differ from a *passive one*?
- A.1.19 What is a *factorial space*?
- A.1.20 What does the notion *compatibility of factors* defines?
- A.1.21 What is the purpose to carry out *transformation of the factorial space*?
- A.1.22 What is the difference between a *full factorial experiment* and a *fractional factorial experiment (fractional replica)*?
- A.1.23 What is the purpose to perform so-called *parallel trials* in the process of an experiment?
- A.1.24 In what does the verification of the *model adequacy* consists?
- A.1.25 What is a *test* and what is the aim to conduct tests?

ДОДАТОК А

Контрольні питання

А.1 Питання до розділу 1

- А.1.1 Що таке *науково-дослідна робота*?
- А.1.2 Назвіть основні методи наукового пізнання.
- А.1.3 Чим відрізняються *фундаментальні дослідження* від *прикладних*?
- А.1.4 Що являють собою методи *дедукції* та *індукції*?
- А.1.5 Чим відрізняються методи *аналізу* та *синтезу*?
- А.1.6 На чому базується *гіпотетичний метод*?
- А.1.7 У чому полягає основна мета експериментальних досліджень?
- А.1.8 З якою метою розробляється *методологія експерименту*?
- А.1.9 Які елементи містить *план-програма експерименту*?
- А.1.10 Що таке *методика експерименту*?
- А.1.11 Назвіть основні завдання експерименту.
- А.1.12 Назвіть основні етапи *дослідно-конструкторської роботи*.
- А.1.13 Дайте визначення поняття *планування експерименту*.
- А.1.14 Які об'єкти дослідження називають «*погано організованими*» або «*дифузними*»?
- А.1.15 Чим відрізняються *факторні експерименти* від *екстремальних експериментів*?
- А.1.16 Що таке *функція відклику*?
- А.1.17 Що таке *рівняння регресії*?
- А.1.18 Чим відрізняється *активний експеримент* від *пасивного*?
- А.1.19 Що таке *факторний простір*?
- А.1.20 Що визначає поняття *сумісність факторів*?
- А.1.21 З якою метою здійснюється *перетворення факторного простору*?
- А.1.22 Чим відрізняється *повний факторний експеримент* від *дробового факторного експерименту* (*дробової репліки*)?
- А.1.23 З якою метою при реалізації експерименту проводяться так звані *паралельні спроби*?
- А.1.24 У чому полягає перевірка *адекватності моделі*?
- А.1.25 Що таке *випробування* і яка мета їх проведення?

A.1.26 What are the “*Test Program and Procedure*” and “*Test Report*”?

A.1.27 What are *research tests* and what are their main tasks?

A.1.28 What types of tests are performed in the process of serial production of electrical and power electronic apparatus?

A.1.29 Name the main types of tests that are typical for electrical apparatus from the standpoint of determining certain characteristics.

A.1.30 What types of tests are performed in the process of operation of electrical and power electronic apparatus?

A.1.31 Name the main technical means that are generally used in the process of research and testing electrical and electronic devices.

A.1.32 In what do the main requirements for the insulation of electrical and electronic devices consist?

A.1.33 In what does the requirement relating to the *switching wear resistance* of electrical apparatus consist?

A.1.34 What does the requirement for electrical apparatus in relation to *peak and short-time withstand currents* consist?

A.1.35 In what does the requirement relating to the *switching capacity* of electrical apparatus?

A.1.36 Name the main external factors that significantly affect the functioning of electrical and power electronic apparatus.

A.2 Questions for Section 2

A.2.1 What is the difference between the concepts of *measurement signal* and *measured quantity (measurand)*?

A.2.2 What is a *measuring system* and what structural elements does it contain?

A.2.3 What is the purpose to use *matching resistors* in measuring systems?

A.2.4 Name the main types of *recording instruments* used in measuring systems.

A.2.5 What is a *measuring transducer* and what function does it perform?

А.1.26 Що являють собою «Програма та методика випробувань» і «Протокол випробувань»?

А.1.27 Що таке *дослідницькі випробування* та які їх основні задачі?

А.1.28 Які види випробувань проводять в процесі серійного виробництва електричних та електронних апаратів?

А.1.29 Назвіть основні види випробувань, що є типовими для електричних апаратів з точки зору визначення тих чи інших характеристик?

А.1.30 Які види випробувань проводять в процесі експлуатації електричних та електронних апаратів?

А.1.31 Назвіть основні технічні засоби, що у загальному випадку використовуються в процесі досліджень та випробувань електричних та електронних апаратів.

А.1.32 У чому полягають основні вимоги до ізоляції електричних та електронних апаратів?

А.1.33 У чому полягає вимога щодо *комутаційної зносостійкості* електричних апаратів?

А.1.34 У чому полягає вимога до електричних апаратів щодо їх *стійкості при протіканні струмів короткого замикання*?

А.1.35 У чому полягає вимога щодо *комутаційної спроможності* електричних апаратів?

А.1.36 Назвіть основні зовнішні фактори, що суттєво впливають на функціонування електричних та електронних апаратів.

А.2 Питання до розділу 2

А.2.1 Чим відрізняються поняття *вимірювальний сигнал* та *вимірювана величина*?

А.2.2 Що таке *вимірювальний пристрій* і які структурні елементи він містить?

А.2.3 Для чого у вимірювальних пристроях використовують *узгоджувальні резистори*?

А.2.4 Назвіть основні типи *реєструвальних приладів*, що використовуються у вимірювальних пристроях.

А.2.5 Що таке *вимірювальний перетворювач* і яку функцію він виконує?

A.2.6 Name the main functional features of *scale*, *functional* and *operational* measuring transducers.

A.2.7 What is the difference between *generator* measuring transducers and *parametric* ones?

A.2.8 Name the main groups of measuring transducers according to the physical principles of operation.

A.2.9 What is the difference between static characteristics of measuring transducers and their dynamic characteristics?

A.2.10 What is the *transfer (conversion) function* of a measuring transducer?

A.2.11 What is the *sensitivity* of a measuring transducer?

A.2.12 Name the main variations of *errors* of measuring transducers.

A.2.13 What is the *transfer function* of a measuring transducer and how does it differ from the *transition function*?

A.2.14 Name the main measuring devices used for direct measurement of high voltage.

A.2.15 Name the main variations of measuring transducers used for high voltage measurements.

A.2.16 What is the principle of operation of *electrostatic voltmeters*?

A.2.17 What is the principle of operation of *rotor (generator) voltmeters*?

A.2.18 What is the purpose to use *measuring sphere gaps* in test setups?

A.2.19 What is the manner to measure a voltage using *measuring sphere gaps*?

A.2.20 What is the principle of high voltage measurement using *additional impedances*?

A.2.21 What are conditions required to use voltage transformers in test setups for high voltage measurements?

A.2.22 What is a *voltage divider* and what is its main parameter?

A.2.23 Name the main variations of voltage dividers and their application area in test setups.

A.2.24 Name the main variations of measuring transducers used for measuring high currents.

A.2.25 What is a non-inductive shunt and what are their variations?

А.2.6 Назвіть основні функціональні особливості *масштабних, функціональних та операційних* вимірювальних перетворювачів.

А.2.7 Чим відрізняються *генераторні* вимірювальні перетворювачі від *параметричних*?

А.2.8 Назвіть основні групи вимірювальних перетворювачів за фізичними принципами функціонування.

А.2.9 Чим відрізняються статичні характеристики вимірювальних перетворювачів від динамічних?

А.2.10 Що являє собою *функція передачі (перетворення)* вимірювального перетворювача?

А.2.11 Що таке *чутливість* вимірювального перетворювача?

А.2.12 Назвіть основні види *похибок* вимірювальних перетворювачів.

А.2.13 Що являє собою *передаточна функція* вимірювального перетворювача і чим вона відрізняється від *перехідної функції*?

А.2.14 Назвіть основні вимірювальні пристрої, що використовують для безпосереднього вимірювання високої напруги.

А.2.15 Назвіть основні типи вимірювальних перетворювачів, що використовуються для вимірювання високої напруги.

А.2.16 У чому полягає принцип дії *електростатичних вольтметрів*?

А.2.17 У чому полягає принцип дії *роторних (генераторних) вольтметрів*?

А.2.18 Для чого у випробних установках використовуються *кульові вимірювальні розрядники*?

А.2.19 Яким чином визначається вимірювана напруга за допомогою *кульових вимірювальних розрядників*?

А.2.20 У чому полягає принцип вимірювання високої напруги за допомогою *додаткових опорів*?

А.2.21 За яких умов можливе використання *трансформаторів напруги* у випробних установках для вимірювання високих напруг?

А.2.22 Що являє собою *дільник напруги* і яким основним параметром він характеризується?

А.2.23 Назвіть основні типи дільників напруги та область їх використання у випробних установках.

А.2.24 Назвіть основні типи вимірювальних перетворювачів, що використовуються для вимірювання великих струмів.

А.2.25 Що являє собою *безіндуктивний шунт* і які їх різновиди існують?

A.2.26 What is a *Rogowski coil* and what is its operating principle?

A.2.27 What is a Hall generator and what is its operating principle?

A.2.28 How is the Faraday effect used to construct measuring transducers?

A.2.29 What is the difference between the methods to measure *static* and *dynamic* current-voltage characteristics?

A.2.30 What is the difference between the *single breakdown* method and *multiple breakdown* one when determining the recovery dielectric strength of the switching device contact gap?

A.2.31 What is the difference between the methods to measure magnetic flux at direct current and alternating one in the magnetizing winding?

A.2.32 Name the main types of measuring transducers used to measure displacement, velocity and acceleration.

A.2.33 Name the main methods and types of measuring transducers used to measure thermal parameters.

A.2.34 What is the principle of *thermal imaging control* of the electrical equipment condition and what are its main advantages?

A.3 Questions for Section 3

A.3.1 What is the difference between *external* and *internal insulation*?

A.3.2 What factors necessitate to conduct dielectric tests in the process of R&D works?

A.3.3 What factors necessitate to conduct dielectric tests in the process of industrial production of electrical and power electronic apparatus?

A.3.4 What factors necessitate to conduct dielectric tests in the operation of electrical and power electronic apparatus?

A.3.5 What is the general principle of dielectric testing of electrical and power electronic apparatus?

A.3.6 What is the most effective method of dielectric testing of electrical and power electronic apparatus?

A.3.7 What is the test voltage and what are its main types?

A.3.8 Name the main types of high voltage sources in high-voltage laboratories.

А.2.26 Що являє собою *катушка Роговського* і у чому полягає її принцип дії?

А.2.27 Що являє собою *перетворювач Холла* і у чому полягає його принцип дії?

А.2.28 Як використовується *ефект Фарадея* для побудови вимірювальних перетворювачів?

А.2.29 Чим відрізняються методики зняття *статичних* та *динамічних* вольт-амперних характеристик?

А.2.30 Чим відрізняються методи *однократних* та *багатократних пробоїв* при визначенні поновлюваної міцності міжконтактного проміжку комутаційного апарата?

А.2.31 Чим відрізняються методи вимірювання магнітного потоку при *постійному* та *змінному струмі* в обмотці намагнічування?

А.2.32 Назвіть основні типи вимірювальних перетворювачів, що використовуються для вимірювання переміщення, швидкості та прискорення?

А.2.33 Назвіть основні методи та типи вимірювальних перетворювачів, що використовуються для вимірювання теплових параметрів.

А.2.34 У чому полягає принцип *тепловізійного контролю* стану електрообладнання і у чому його основні переваги?

А.3 Питання до розділу 3

А.3.1 Чим відрізняється *зовнішня ізоляція* від *внутрішньої*?

А.3.2 Які фактори викликають необхідність проведення випробувань ізоляції в процесі НДР та ДКР?

А.3.3 Які фактори викликають необхідність проведення випробувань ізоляції в процесі промислового виробництва електричних та електронних апаратів?

А.3.4 Які фактори викликають необхідність проведення випробувань ізоляції в процесі експлуатації електричних та електронних апаратів?

А.3.5 У чому взагалі полягає принцип випробування ізоляції електричних та електронних апаратів?

А.3.6 Який спосіб випробування ізоляції електричних та електронних апаратів є найбільш ефективним?

А.3.7 Що таке *випробна напруга* і які її основні різновиди?

А.3.8 Назвіть основні різновиди джерел високої напруги у висковольтних залах.

A.3.9 Name the main types of auxiliary equipment in a high-voltage laboratory.

A.3.10 Name the main parameters of a full lightning impulse.

A.3.11 Name the main parameters of a *switching impulse*.

A.3.12 Name the main elements of a HV impulse generator.

A.3.13 What is the purpose to use *multi-stage* HV impulse generators?

A.3.14 In what is the technology of *impulse voltage* testing?

A.3.15 Name the main types of *applied voltage* tests.

A.3.16 What is the purpose to use a *cascade connection* of test transformers in applied voltage testing?

A.3.17 What is the purpose to use *resonant circuits* in applied voltage testing?

A.3.18 What is the main feature of *induced voltage* testing?

A.3.19 In what is the manner *DC high voltage* generated for applied voltage testing?

A.3.20 What are the advantages of DC high voltage testing?

A.3.21 Name the main types of circuits that are mainly used to increase the value of the DC test voltage.

A.3.22 In what is a technique of applied voltage testing?

A.3.23 What is a *partial discharge* and what are the parameters characterize it?

A.3.24 Name the main methods for detecting partial discharges that exist today.

A.3.25 What equipment and circuits are used to measure the *dielectric loss tangent*?

A.3.26 How is the insulation DC resistance measured and what instruments are used in the process?

A.3.27 What is the dielectric absorption ratio (DAR) and how is the degree of insulation moisture determined?

A.3.28 Name the main types of dielectric tests for low-voltage apparatus and components of low-voltage circuits.

А.3.9 Назвіть основні різновиди допоміжного обладнання високовольтного залу.

А.3.10 Назвіть основні параметри *повного грозового імпульсу*?

А.3.11 Назвіть основні параметри *комутаційного імпульсу*.

А.3.12 Назвіть основні елементи *генератора імпульсної напруги*.

А.3.13 З якою метою використовують *багатоступінчасті* генератори імпульсної напруги?

А.3.14 У чому полягає методика випробувань *імпульсною напругою*?

А.3.15 Назвіть основні різновиди випробувань *прикладеною напругою*.

А.3.16 Для чого при випробуваннях прикладеною напругою використовується *каскадне з'єднання* випробувальних трансформаторів?

А.3.17 Для чого при випробуваннях прикладеною напругою використовують *резонансні схеми*?

А.3.18 У чому полягає основна особливість випробування *індукованою напругою*?

А.3.19 Яким чином створюється *постійна напруга* для випробування електричних та електронних апаратів?

А.3.20 Які переваги мають випробування *постійною напругою*?

А.3.21 Назвіть основні різновиди схем, що переважно використовують для підвищення величини *постійної випробної напруги*.

А.3.22 У чому полягає методика випробувань *прикладеною напругою*?

А.3.23 Що таке *частковий розряд* і якими параметрами він характеризується?

А.3.24 Назвіть основні методи виявлення *часткових розрядів*, які існують на сьогоднішній день.

А.3.25 Яке обладнання та схеми використовуються для вимірювання *тангенса кута діелектричних втрат*?

А.3.26 Яким чином здійснюється і які прилади використовуються для вимірювання опору ізоляції *постійному струму*?

А.3.27 Що таке *коефіцієнт абсорбції* і як визначається ступінь зволоження ізоляції?

А.3.28 Назвіть основні види випробувань ізоляції *низьковольтних апаратів та елементів низьковольтних схем*.

A.4 Questions for Section 4

A.4.1 What includes the concept of *switching capability*?

A.4.2 What does the concept of switching (making) capacity defines?

A.4.3 What does the concept of switching wear resistance defines?

A.4.4 What is a *test circuit*?

A.4.5 Name the main parameters that the test circuit must provide.

A.4.6 Name the main components of the test circuit and their purpose.

A.4.7 Name the main methods used in the process of the test circuit adjustment as for the parameters of the switched current.

A.4.8 Name the main methods used in the process of the test circuit adjustment as for the parameters of the transient recovery voltage.

A.4.9 What are normalized (reference) curves of transient recovery voltage and how are they used in the test circuit adjustment?

A.4.10 How is the transient recovery voltage for low-voltage switchgear normalized?

A.4.11 What is the main problem of testing high-voltage circuit breakers for switching capability?

A.4.12 What are *direct* and *indirect tests* for switching capability and in what cases are they performed?

A.4.13 Name the main methods of *indirect tests* used when testing circuit breakers for switching capability.

A.4.14 What is the method of *indirect tests* for switching capability is the most effective and in what does it consist of?

A.4.15 What is an *impulse current generator* and what are its main types?

A.4.16 Name the main types of power supply circuits for *high-power laboratories*.

A.4.17 In what cases are to conduct tests of circuit breakers for switching capability in *real electrical systems* possible?

A.4.18 Name the main types of switching tests of low-voltage control apparatus.

А.4 Питання до розділу 4

А.4.1 Що включає у себе поняття *комутаційна спроможність* апарата?

А.4.2 Що визначає поняття *вимикальна (вмикальна) спроможність*?

А.4.3 Що визначає поняття *комутаційна зносостійкість*?

А.4.4 Що таке *випробний контур*?

А.4.5 Назвіть основні параметри, що має забезпечити випробний контур.

А.4.6 Назвіть основні елементи випробного контуру та їх призначення.

А.4.7 Назвіть основні методи, що використовуються в процесі налаштування випробного контуру щодо параметрів комутуваного струму.

А.4.8 Назвіть основні методи, що використовуються в процесі налаштування випробного контуру щодо параметрів *перехідної поновлюваної напруги*.

А.4.9 Що таке *нормовані обвідні криві* перехідної поновлюваної напруги і як вони використовуються при налаштуванні випробного контуру?

А.4.10 Як нормується перехідна поновлювана напруга для комутаційних апаратів низької напруги?

А.4.11 У чому полягає основна проблема випробувань вимикачів високої напруги на комутаційну спроможність?

А.4.12 Що таке *прямі та непрямі випробування* на комутаційну спроможність і в яких випадках проводяться ті чи інші?

А.4.13 Назвіть основні методи *непрямих випробувань*, що використовують при проведенні випробувань вимикачів на комутаційну спроможність.

А.4.14 Який метод непрямих випробувань на комутаційну спроможність є найбільш ефективним і у чому він полягає?

А.4.15 Що таке *генератор імпульсного струму* і які їх основні різновиди?

А.4.16 Назвіть основні різновиди схем живлення *лабораторій великої потужності*.

А.4.17 В яких випадках можливе проведення випробувань вимикачів на комутаційну спроможність в *реальних електричних системах*?

А.4.18 Назвіть основні види комутаційних випробувань апаратів керування низької напруги.

A.4.19 Name the main types of switching tests of low-voltage switchgear apparatus.

A.4.20 Name the main types of switching tests of high-voltage switchgear apparatus.

A.4.21 In what is the requirement as for ensuring equivalence of circuits for switching capability tests consists?

A.4.22 What type of impulse current generator provides the best equivalence of tests?

A.4.23 What is an *oscillatory circuit* and what functions does it perform when conducting switching tests?

A.4.24 What is the difference between a *single-frequency* oscillatory circuit and a *two-frequency* one?

A.4.25 Name the main types of *synthetic circuits* used for testing high-voltage circuit breakers for switching capability.

A.4.26 What switching conditions should synthetic circuits reproduce when testing high-voltage circuit breakers?

A.5 Questions for Section 5

A.5.1 What are the main reasons necessitating to conduct temperature-rise tests of electrical and power electronic apparatus?

A.5.2 Name the main types of tests related to checking the thermal behavior of apparatus and their components.

A.5.3 Name the main components of electrical and power electronic apparatus that are objects of temperature-rise tests.

A.5.4 In what is the procedure to conduct temperature-rise tests of electrical and power electronic apparatus?

A.5.5 Why are temperature-rise tests of electrical and power electronic apparatus usually long-term?

A.5.6 Name and describe the main methods that enable to accelerate the temperature-rise test.

A.5.7 Name the main types of tests that include check of the apparatus stability to let-through short-circuit currents.

A.5.8 What power sources are used when conducting peak and short-time withstand current tests?

А.4.19 Назвіть основні види комутаційних випробувань апаратів розподільних пристроїв низької напруги.

А.4.20 Назвіть основні види комутаційних випробувань апаратів розподільних пристроїв високої напруги.

А.4.21 У чому полягає вимога щодо забезпечення *еквівалентності* схем випробування на комутаційну спроможність?

А.4.22 Який тип генератора імпульсного струму забезпечує найкращу еквівалентність випробувань?

А.4.23 Що таке *коливальний контур* і які функції він виконує при проведенні комутаційних випробувань?

А.4.24 Чим відрізняється *одночастотний* коливальний контур від *двохчастотного*?

А.4.25 Назвіть основні різновиди *синтетичних схем*, які використовуються для випробувань високовольтних вимикачів на комутаційну спроможність.

А.4.26 Які режими комутації повинні відтворювати синтетичні схеми при випробуваннях високовольтних вимикачів?

А.5 Питання до розділу 5

А.5.1 У чому полягають основні причини необхідності проведення випробувань електричних та електронних апаратів на нагрів?

А.5.2 Назвіть основні види випробувань, які пов'язані з перевіркою теплових режимів апаратів і їх елементів

А.5.3 Назвіть основні елементи електричних та електронних апаратів, які є об'єктами випробувань на нагрів.

А.5.4 У чому полягає методика проведення випробувань електричних та електронних апаратів на нагрів?

А.5.5 Чому випробування електричних та електронних апаратів на нагрів є, як правило, довготривалими?

А.5.6 Назвіть та охарактеризуйте основні способи, що дозволяють прискорити випробування на нагрів.

А.5.7 Назвіть основні види випробувань, які містить у собі перевірку стійкості апаратів при протіканні наскрізних струмів короткого замикання.

А.5.8 Які джерела живлення використовуються при проведенні випробувань на стійкість при протіканні наскрізних струмів короткого замикання?

A.5.9 Name the main conditions under which the apparatus is considered to have withstood the let-through short-circuit current test.

A.5.10 Name the main types of measurements and checks that comprise *electromechanical* tests of electrical apparatus.

A.5.11 Name the main types of measurements and checks that comprise *electromagnetic* tests of electrical apparatus.

A.5.12 What types of electrical devices are referred to power electronic apparatus?

A.5.13 What devices are the main element base of power electronic apparatus?

A.5.14 Name the main types of measurements and checks that are referred to *load tests* of power electronic apparatus.

A.5.15 Name the main types of *non-electrical* tests of electrical and power electronic apparatus.

A.5.16 In what is the procedure of the *mechanical wear resistance test* of electrical apparatus?

A.5.17 What do climatic tests present and what is the principle of their conducting?

A.5.18 Name the main types and equipment of climatic tests of electrical and power electronic apparatus.

A.5.19 Name the main types and equipment of tests for *external mechanical effects*.

А.5.9 Назвіть основні умови, за яких апарат вважається таким, що витримав випробування наскрізними струмами короткого замикання.

А.5.10 Назвіть основні види вимірювань та перевірок, які складають *електромеханічні* випробування електричних апаратів.

А.5.11 Назвіть основні види вимірювань та перевірок, які складають *електромагнітні* випробування електричних апаратів.

А.5.12 Які види електротехнічних пристроїв відносяться до силових електронних апаратів?

А.5.13 Які прилади є основною елементною базою силових електронних апаратів?

А.5.14 Назвіть основні види вимірювань та перевірок, які відносяться до *навантажувальних* випробувань силових електронних апаратів.

А.5.15 Назвіть основні види *неелектричних* випробувань електричних та електронних апаратів.

А.5.16 У чому полягає методика випробування *механічної зносостійкості* електричних апаратів?

А.5.17 Що являють собою *кліматичні* випробування і чому полягає принцип їх проведення?

А.5.18 Назвіть основні різновиди та обладнання кліматичних випробувань електричних та електронних апаратів.

А.5.19 Назвіть основні різновиди та обладнання випробувань на *зовнішні механічні дії*.

REFERENCE LIST

1. Blyzniakov O.V. Research and testing of electrical apparatus: tutorial. – 2-nd edition, revised and supplemented. – Zaporizhzhia: ZNTU, 2013. – 126 p. (in Ukrainian)
2. Testing and operation of electrical apparatus. Laboratory practicum: tutorial / V.O. Brzhezytskyi, Ya.O. Haran, O.R. Protsenko. – K.: KPI named after Igor Sikorskyi, 2022. – 93 p. (in Ukrainian)
3. Hryshchuk Yu. S. Basics of scientific research: tutorial. – Kharkiv: KhPI, 2008. – 232 p. (in Ukrainian)
4. Koryagin M.V. Basics of scientific research: tutorial / M.V. Koryagin, M. Yu. Chick. – 2nd edition, stereotypical. – K.: Alerta, 2017. – 622 p. (in Ukrainian)
5. Motygin V.V. Designing an experiment in engineering research (laboratory practicum): tutorial / V.V. Motygin, S.M. Pavlov. – Vinnytsia: VDTU, 2001. – 82 p. (in Ukrainian)
6. Polischuk E. S. Measuring transducers. – K.: Vishcha shkola, 1981. – 296 p. (in Russian)
7. High Voltage Engineering: tutorial / O.V. Guy, B.I. Kulyk – K.: COMPRINT PC, 2021. – 710 p. (in Ukrainian)
8. Electrical equipment testing code. COY-H EE 20.302: 2020. Ministry of Energy and Environmental Protection of Ukraine, PJSC National Energy Company "Ukrenergo", Kharkiv: INDUSTRIJA, 2021. – 232 p. (in Ukrainian)
9. Technical operating rules for consumers' electrical installations. – K.: Osnova, 2023. – 328 p. (in Ukrainian)
10. Safe operating rules for consumers' electrical installations НПАОП 40.1-1.21-98: approved. 09.01.98 No. 4. – K.: Osnova, 2024. – 176 p. (in Ukrainian)
11. System of labor safety standards. Means of collective protection of workers. General requirements and classification: ДСТУ 7238: 2011. – K.: Derzhspozhivstandard of Ukraine, 2011. – 11 p. (in Ukrainian)
12. System of labor safety standards. Means of individual protection of workers. General requirements and classification: ДСТУ 7239: 2011. – K.: Derzhspozhivstandard of Ukraine, 2011. – 11 p. (in Ukrainian)

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Близняков О. В. Дослідження та випробування електричних апаратів: навч. посібник / О.В. Близняков. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2013. – 126 с.
2. Випробування та експлуатація електричних апаратів. Лабораторний практикум: навч. посібник / В.О. Бржезицький, Я.О. Гаран, О.Р. Проценко. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 93 с.
3. Грищук Ю.С. Основи наукових досліджень: навч. посібник / Ю.С. Грищук. – Харків: ХПІ, 2008. – 232 с.
4. Корягін М.В. Основи наукових досліджень: навч. посібник / М.В. Корягін, М.Ю. Чік. – 2-ге видання, стереотипне. – К.: Алерта, 2017. – 622 с.
5. Мотигін В.В. Планування експерименту в інженерних дослідженнях (лабораторний практикум): навч. посібник / В.В. Мотигін, С.М. Павлов. – Вінниця: ВДТУ, 2001. – 82 с.
6. Полищук Е. С. Измерительные преобразователи / Е. С. Полищук. – К.: Вища школа, 1981. – 296 с.
7. Техніка високих напруг: навч. посібник / О.В. Гай, Б.І. Кулик–К.: ЦП «КОМПРИНТ», 2021. – 710 с.
8. Норми випробування електрообладнання. СОУ-Н ЕЕ 20.302: 2020. Міністерство енергетики та захисту довкілля України, ПАТ Національна енергетична компанія «Укренерго», Харків: ІНДУСТРІЯ, 2021. – 232 с.
9. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. – К: Основа, 2023. – 328 с.
10. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів НПАОП 40.1-1.21-98: затв. 09.01.98 № 4. – К: Основа, 2024. – 176 с.
11. Система стандартів безпеки праці. Засоби колективного захисту працюючих. Загальні вимоги та класифікація: ДСТУ 7238: 2011. – К.: Держспоживстандарт України, 2011. – 11 с.
12. Система стандартів безпеки праці. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація: ДСТУ 7239: 2011. – К.: Держспоживстандарт України, 2011. – 11 с.

13. Electrical articles. Test methods as to environment climatic factors resistance: ДСТУ 8280: 2015. – K.: SE "UkrR&TC", 2015. – 58 p. (in Ukrainian)
14. Electrical equipment and installations for AC voltages 3 kV and higher. General methods of dielectric tests: ГОСТ 1516.2-97. – Minsk: IPC Publishing House of Standards, 1998. – 35 p. (in Russian)
15. Electrical equipment for AC voltages from 1 to 750 kV. Requirements for dielectric strength of insulation (reprint, 2003): ГОСТ 1516.3-96. – Minsk: IPC Publishing House of Standards, 1998. – 54 p. (in Russian)
16. Low-voltage switching devices. General specifications: ДСТУ 3020-95 (ГОСТ 12434-93). – K.: Gosstandart of Ukraine, 1995. – 37 p.
17. Low-voltage electric apparatus. Test methods: ДСТУ 2993-95 (ГОСТ 2933-93). – K.: Derzhstandard of Ukraine, 1995. – 32 p.
18. High-Voltage Engineering and Testing (3rd edition) / Edited by Hugh M. Ryan, The Institution of Engineering and Technology, 2013. – 960 p.
19. Electrical Power Equipment Maintenance and Testing, Second Edition, Paul Gill. – CRC Press Taylor & Francis Group, 2009. – 1002 p.
20. Hauschild W., Lemke E. High-Voltage Test and Measuring Techniques, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. – 518 p.
21. Naidu M.S., Kamaraju V. High-Voltage Engineering (5th edition) / Published by McGraw Hill Education (India) Private Limited, 2013.
22. Lucas J. R. High-Voltage Engineering (second edition) / University of Moratuwa, Sri Lanka, 2001.
23. High Voltage Engineering, Second Edition, Wadhwa C. L. – New Age International (P) Ltd., 2007. – 312 p.
24. Browne T.E. Circuit Interruption: Theory and Techniques. – New York and Basel: Marcel Dekker, 1984. – 701 p.
25. Garzon R. High Voltage Circuit Breakers: Design and Applications. Second Edition, Revised and Expanded. – New York and Basel: Marcel Dekker, 2002. – 473 p.
26. Electric power transformer engineering / Edited by James H. Harlow. – CRC Press LLC, 2004. – 481 p.
27. FOCS – Fiber-Optic Current Sensor. ABB Switzerland Ltd. Copyright 2011 ABB.
28. IEC 60060:2020 SER. High-voltage test techniques – ALL PARTS, 2024. – 331 p.

13. Вироби електротехнічні. Методи випробування на тривкість до дії зовнішніх кліматичних чинників: ДСТУ 8280: 2015. – К.: ДП “УкрНДНЦ”, 2015. – 58 с.

14. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение от 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции: ГОСТ 1516.2-97. – Минск: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 35 с.

15. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции (переиздание, 2003 г.): ГОСТ 1516.3-96. – Минск: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 54 с.

16. Аппараты коммутационные низковольтные. Общие технические условия: ДСТУ 3020-95 (ГОСТ 12434-93). – К.: Госстандарт Украины, 1995. – 37 с.

17. Апарати електричні низьковольтні. Методи випробувань: ДСТУ 2993-95 (ГОСТ 2933-93). – К.: Держстандарт України, 1995. – 32 с.

18. High-Voltage Engineering and Testing (3rd edition) / Edited by Hugh M. Ryan, The Institution of Engineering and Technology, 2013. – 960 p.

19. Electrical Power Equipment Maintenance and Testing, Second Edition, Paul Gill. – CRC Press Taylor & Francis Group, 2009. – 1002 p.

20. Hauschild W., Lemke E. High-Voltage Test and Measuring Techniques, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. – 518 p.

21. Naidu M.S., Kamaraju V. High-Voltage Engineering (5th edition) / Published by McGraw Hill Education (India) Private Limited, 2013.

22. Lucas J. R. High-Voltage Engineering (second edition) / University of Moratuwa, Sri Lanka, 2001.

23. High Voltage Engineering, Second Edition, Wadhwa C. L. – New Age International (P) Ltd., 2007. – 312 p.

24. Browne T.E. Circuit Interruption: Theory and Techniques. – New York and Basel: Marcel Dekker, 1984. – 701 p.

25. Garzon R. High Voltage Circuit Breakers: Design and Applications. Second Edition, Revised and Expanded. – New York and Basel: Marcel Dekker, 2002. – 473 p.

26. Electric power transformer engineering / Edited by James H. Harlow. – CRC Press LLC, 2004. – 481 p.

27. FOCS – Fiber-Optic Current Sensor. ABB Switzerland Ltd. Copyright 2011 ABB.

28. IEC 60060:2020 SER. High-voltage test techniques – ALL PARTS, 2020. – 331 p.

29. IEC 60270: 2000. High-voltage test techniques – Partial discharge measurements, 3rd edition, 2000. – 99 p.
30. IEC 60068-2: 2024 SER. Environmental testing – Part 2: Tests – ALL PARTS, 2024. – 2978 p.
31. IEC 60052:2002 International standard – Voltage measurement by means of standard air gaps, 3rd edition, 2002. – 55 p.
32. IEC 60947: 2020 SER. Low-voltage switchgear and controlgear – ALL PARTS, 2020. – 4792 p.
33. IEC 62271: 2020 SER. High-voltage switchgear and controlgear – ALL PARTS, 2020. – 7618 p.
34. IEC 61869-1: 2007. Instrument transformers – Part 1: General requirements, 1st edition, 2007. – 130 p.
35. IEC 60214-1: 2014. Tap changers – Part 1: Performance requirements and test methods, Edition 2.0, 2014. – 156 p.
36. IEC 60146-1-1: 2024. Semiconductor converters – General requirements and line commutated converters – Part 1-1: Specification of basic requirements, 2024. – 182 p.
37. IEC 60146-2: 1999. Semiconductor converters – Part 2: Self-commutated semiconductor converters including direct d.c. converters, 1999. – 91 p.
38. Bazhanov S. A. Preventive testing of insulation of high-voltage equipment / S. A. Bazhanov, V. F. Voskresensky. – M.: Energia, 1977. – 288 p. (in Russian)
39. Bolotin I. B. Measurements when testing of apparatus in short-circuit conditions / I. B. Bolotin, L. Z. Eidel. – M.: Energoatomizdat, 1988. – 200 p. (in Russian)
40. Dzerbitsky S. Testing of electrical devices / Transl. from Polish by V.I. Kassel, edited by O.B. Bron. 2-nd ed., revised and additional – L.: Energia, 1977. – 204 p. (in Russian)
41. Kaplan V.V. Synthetic testing of high-voltage circuit breakers / V.V. Kaplan, V.M. Nashatyr. – M.: Energia, 1980. – 200 p. (in Russian)
42. Kuzhekin I.P. Test setups and measurements at high voltage / I.P. Kuzhekin – M.: Energia, 1980. – 136 p. (in Russian)
43. Namitokov K.K. Testing of low-voltage apparatus / K.K. Namitokov – M.: Energoatomizdat, 1985. – 248 p. (in Russian)
44. Petinov O. V. Testing of electrical apparatus / O.V. Petinov, E.F. Shcherbakov. – M.: Vysshaja shkola, 1985. – 215 p. (in Russian)

29. IEC 60270: 2000. High-voltage test techniques – Partial discharge measurements, 3rd edition, 2000. – 99 p.
30. IEC 60068-2: 2024 SER. Environmental testing – Part 2: Tests – ALL PARTS, 2024. – 2978 p.
31. IEC 60052:2002 International standard – Voltage measurement by means of standard air gaps, 3rd edition, 2002. – 55 p.
32. IEC 60947: 2020 SER. Low-voltage switchgear and controlgear – ALL PARTS, 2020. – 4792 p.
33. IEC 62271: 2020 SER. High-voltage switchgear and controlgear – ALL PARTS, 2020. – 7618 p.
34. IEC 61869-1: 2007. Instrument transformers – Part 1: General requirements, 1st edition, 2007. – 130 p.
35. IEC 60214-1: 2014. Tap changers – Part 1: Performance requirements and test methods, Edition 2.0, 2014. – 156 p.
36. IEC 60146-1-1: 2024. Semiconductor converters – General requirements and line commutated converters – Part 1-1: Specification of basic requirements, 2024. – 182 p.
37. IEC 60146-2: 1999. Semiconductor converters – Part 2: Self-commutated semiconductor converters including direct d.c. converters, 1999. – 91 p.
38. Бажанов С. А. Профилактические испытания изоляции оборудования высокого напряжения / С. А. Бажанов, В. Ф. Воскресенский. – М.: Энергия, 1977. – 288 с.
39. Болотин И. Б. Измерения при испытании аппаратов в режимах короткого замыкания / И. Б. Болотин, Л. З. Эйдель. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 200 с.
40. Дзербидцкий С. Испытания электрических аппаратов / Пер. с польского В.И. Касселя под ред. О.Б. Брона. 2-е изд., перераб. и доп.– Л.: Энергия, 1977. – 204 с.
41. Каплан В. В. Синтетические испытания высоковольтных выключателей / В. В. Каплан, В. М. Нашатырь. – М.: Энергия, 1980. – 200 с.
42. Кужекин И. П. Испытательные установки и измерения на высоком напряжении / И. П. Кужекин – М.: Энергия, 1980. – 136 с.
43. Намитоков К. К. Испытания аппаратов низкого напряжения / К. К. Намитоков – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
44. Петин О. В. Испытание электрических аппаратов / О.В. Петин, Е. Ф. Щербаков. – М.: Высшая школа, 1985. – 215 с.

45. Smirnov S. M. High voltage impulse generators / S. M. Smirnov, P. V. Terentyev. – M-L.: Energia, 1964. – 240 p. (in Russian)
46. Schwab A. High Voltage Measurements: Measuring Instruments and Measuring Techniques / Transl. from German by I. P. Kuzhekin. – M.: Energoatomizdat, 1983. – 262 p. (in Russian)
47. Jacobson I.A. Testing of power transformer tap changers / I.A. Jacobson. – M.: Energy, 1970. – 56 p. (in Russian)
48. Kurochkin A.K. Application of inductive energy stores in synthetic circuits for testing AC circuit breakers / A.K. Kurochkin, D.P. Leper, G.V. Chuchukin // *Elecfritchestvo*. – 1985. – No. 12. – Pp. 47–49. (in Russian)
49. Boot D. A. Inductive energy stores / D. A. Boot // *Elecfritchestvo*. – 1987. – No. 10. – Pp. 14–24. (in Russian)

45. Смирнов С. М. Генераторы импульсов высокого напряжения / С. М. Смирнов, П. В. Терентьев. – М-Л.: Энергия, 1964. – 240 с.
46. Шваб А. Измерения на высоком напряжении: измерительные приборы и способы измерения / Пер. с нем. И. П. Кужекина. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 262 с.
47. Якобсон И.А. Испытания переключающих устройств силовых трансформаторов / И.А. Якобсон. – М.: Энергия, 1970. – 56 с.
48. Курочкин А. К. Применение индуктивных накопителей энергии в синтетических схемах испытания выключателей переменного тока / А. К. Курочкин, Д. П. Лепер, Г. В. Чучукин // Электричество. – 1985. – № 12. – С. 47–49.
49. Бут Д. А. Индуктивные накопители энергии / Д. А.Бут // Электричество. – 1987. – № 10. – С. 14–24.

Навчальне видання

з паралельним текстом
(англійською та українською мовами)

АНДРІЄНКО Петро Дмитрович
БЛИЗНЯКОВ Олександр Вікторович

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ
ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА ЕЛЕКТРОННИХ АПАРАТІВ**
Навчальний посібник

Комп'ютерний набір *Близняков О.В.*

Підписано до друку 14.02.25 Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 19,47.
Тираж 100 прим. Зам. № 151.

Національний університет «Запорізька політехніка»
Україна, 69063, м. Запоріжжя, вул. Університетська, 64
Тел.: (061) 769–82–96, 220–12–14

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6952 від 22.10.2019.