

Міністерство науки і освіти України
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Програма та контрольні завдання

з дисципліни:

**"Дослідження та випробування електричних
та електронних апаратів"**

для студентів заочної форми навчання спеціальності:

141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(освітня програма «Електричні та електронні апарати»)

2020

Програма та контрольні завдання з дисципліни: "Дослідження та випробування електричних та електронних апаратів" для студентів заочної форми навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (освітня програма «Електричні та електронні апарати»)/ Укладач О.В. Близняков. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 26 с.

Укладач: Близняков Олександр Вікторович, доцент, к.т.н.

Рецензент: Андрієнко Петро Дмитрович, професор, д.т.н.

Відповідальний за випуск: Мохнач Річард Едуардович

Затверджено на засіданні кафедри
“Електричні та електронні апарати”.
Протокол № 3 від 19 жовтня 2020 р.

Рекомендовано до видання на засіданні
науково-методичної комісії
електротехнічного факультету.
Протокол № 3 від 19 листопада 2020 р.

З М І С Т

1. МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДИСЦИПЛІНИ.....	4
2. ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ	6
2.1 Зміст та організація досліджень та випробувань електричних та електронних апаратів	6
2.2 Вимірювальні пристрої експериментальних та випробувальних установок та їх елементи.....	6
2.3 Дослідження та випробування електричної ізоляції електричних та електронних апаратів.....	7
2.4 Комутаційні випробування електричних апаратів	7
2.5 Інші види досліджень та випробувань електричних та електронних апаратів.....	8
3. КОНТРОЛЬНА РОБОТА	9
3.1 Задача №1.....	9
3.2 Задача №2.....	12
3.3 Задача №3.....	17
3.4 Задача №4.....	20
ЛІТЕРАТУРА.....	24

1. МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДИСЦИПЛІНИ

Традиційно значна частина навчального часу дисциплін за освітньою програмою "Електричні та електронні апарати" спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» присвячується, головним чином, вивченню теорії електричних апаратів, розрахунку, конструюванню, оптимізації окремих їх елементів, проектуванню апаратів у цілому. Проте, сучасний молодий фахівець не може не володіти питаннями, що пов'язані з проведенням науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт, а також випробувань електричних та електронних апаратів. Тому, студентам, що навчаються на другому (магістерському) рівні вищої освіти за освітньою програмою "Електричні та електронні апарати" спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», відповідним навчальним планом пропонується дисципліна "Дослідження та випробування електричних та електронних апаратів", яка призначена, в якійсь мірі, подолати цей недолік.

Основною метою вивчення цієї дисципліни є одержання студентами початкових знань щодо проведення науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт, а також випробувань електричних та електронних апаратів.

Основними задачами дисципліни є вивчення організаційних та технічних засобів проведення науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт, а також випробувань, що проводяться в процесі розробки, виробництва та експлуатації електричних та електронних апаратів.

Дисципліна "Дослідження та випробування електричних та електронних апаратів" базується на матеріалі попередніх дисциплін: фізика, вища математика, інженерна механіка, електротехнічні матеріали, теоретичні основи електротехніки, основи метрології та електричних вимірювань, основи проектування електромеханічних пристроїв та систем, основи електроніки та мікросхемотехніки, основи теорії електричних апаратів, електричні машини, електричні апарати автоматики та керування, електричні апарати високої напруги, експлуатація електричних та електронних апаратів.

В результаті вивчення дисципліни студент повинен

з н а т и :

- організаційні та технічні засоби проведення науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт електричних та електронних апаратів;

- організаційні, технічні та технологічні засоби проведення випробувань в процесі розробки, промислового виробництва та експлуатації електричних та електронних апаратів;
- основні види випробувань електричних та електронних апаратів відповідно до діючих стандартів; випробне обладнання, схеми та методи їх проведення випробувань;

в м і т и :

- розробляти організаційні та технічні засоби проведення науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт щодо електричних апаратів;
- розробляти організаційні та технічні засоби а також програми та методики проведення випробувань електричних та електронних апаратів в процесі їх розробки, промислового виробництва та експлуатації;
- здійснювати випробування електричних апаратів згідно діючих стандартів, технічних умов та конструкторської документації, оцінювати їх результати та приймати відповідні рішення щодо їх якості.

2. ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ

2.1 Зміст та організація досліджень та випробувань електричних та електронних апаратів

Науково-дослідна та дослідно-конструкторська робота (НДР та ДКР): поняття, класифікація, основні етапи. Методи теоретичного та експериментального дослідження: поняття, сутність, методологія та планування експерименту. Випробування електричних та електронних апаратів в процесі НДР та ДКР, а також промислового виробництва та експлуатації: поняття, класифікація, основні етапи, нормативна документація.

Лекції – 1 година.

Самостійна робота – 29 годин.

Література, що рекомендується [1–7,19]

Дисципліни, що забезпечують: основи теорії електричних апаратів, основи силової електроніки, електромеханічні апарати, електричні апарати автоматики та керування, електричні апарати високої напруги, основи проектування електромеханічних пристроїв та систем.

2.2 Вимірювальні пристрої експериментальних та випробувальних установок та їх елементи

Основні поняття. Стисла характеристика параметрів що вимірюються під час досліджень та випробувань електричних та електронних апаратів і особливості їх експериментального визначення. Структура вимірювальних пристроїв та їх основні елементи. Вимірювальні перетворювачі: класифікація, основні характеристики. Експериментальне визначення струму та напруги. Експериментальне визначення електричної потужності та енергії. Зняття вольт-амперних характеристик елементів. Експериментальне визначення поновлюваної міцності. Експериментальне визначення магнітних параметрів. Експериментальне визначення переміщення, швидкості, прискорення та часових параметрів. Експериментальне визначення статичних сил, моментів та механічних напруг. Експериментальне визначення теплових параметрів. Тепловізійна діагностика електричного обладнання

Лекції – 1,5 годин.

Лабораторні роботи – 2 годин.

Самостійна робота – 46,5 годин.

Література, що рекомендується [5–7,12, 13, 15, 19, 30, 31].

Дисципліни, що забезпечують: Вища математика, фізика, теоретичні основи електротехніки, основи метрології та електричних вимірювань, основи електроніки та мікросхемотехніки, основи теорії електричних апаратів, електричні апарати автоматики та керування, електричні апарати високої напруги, експлуатація електричних та електронних апаратів.

2.3 Дослідження та випробування електричної ізоляції електричних та електронних апаратів

Основні фактори, що обумовлюють необхідність проведення досліджень та випробувань ізоляції. Загальні методи перевірки якості ізоляції, поняття випробної напруги. Умови та обладнання для дослідження та випробування ізоляції. Випробування ізоляції імпульсною напругою: параметри грозового та комутаційного імпульсів, принцип дії генератора імпульсної напруги, методика проведення випробувань. Випробування ізоляції прикладеною напругою: види випробувань, схеми випробувань, методики проведення випробувань. Інші методи перевірки якості ізоляції: визначення опору постійному струму, струму витoku, коефіцієнта абсорбції, тангенсу кута діелектричних втрат, випробування на наявність видимої корони, характеристик часткових розрядів.

Лекції – 1,5 години.

Лабораторні роботи – 1,5 години.

Самостійна робота – 27 годин.

Література, що рекомендується [9, 11, 12, 14, 16–22, 24–29, 32–37]

Дисципліни, що забезпечують: Теоретичні основи електротехніки, електротехнічні матеріали, основи теорії електричних апаратів, електричні апарати високої напруги, експлуатація електричних та електронних апаратів.

2.4 Комутаційні випробування електричних апаратів

Випробний контур для комутаційних випробувань: поняття, основні елементи, налаштування на потрібні параметри струму та поновлюваної напруги. Силове устаткування випробних установок. Прямі та непрямі випробування. Використання синтетичних схем та їх принцип дії. Основні різновиди та принцип дії генераторів імпульсного струму та джерел поновлюваної напруги. Використання коливального контуру для комутаційних випробувань: основні елементи та принцип дії. Електричні схеми синтетичних випробувань: синтетичні схеми з послідовним та паралельним накладенням струму. Випробу-

вання вимикачів в умовах невіддаленого короткого замикання, штучні схеми ліній електропередач. Комутаційні випробування з утриваленням існування електричної дуги. Використання індуктивних накопичувачів енергії у синтетичних схемах. Режими комутаційних випробувань електричних апаратів низької та високої напруги.

Лекції – 2,5 години.

Лабораторні роботи – 1,5 години.

Самостійна робота – 38 годин.

Література, що рекомендується [8, 11, 20, 25, 27, 29, 32, 33]

Дисципліни, що забезпечують: Теоретичні основи електротехніки, електричні машини, основи теорії електричних апаратів, електричні апарати автоматики та керування, електричні апарати високої напруги, експлуатація електричних та електронних апаратів.

2.5 Інші види досліджень та випробувань електричних та електронних апаратів

Випробування на стійкість при протіканні кризного струму короткого замикання. Випробування на нагрів номінальним струмом. Електромагнітні та електромеханічні випробування. Випробування механічної зносостійкості. Випробування на вібростійкість та удароміцність. Кліматичні випробування електричних та електронних апаратів.

Лекції – 1,5 години.

Лабораторні роботи – 1 година.

Самостійна робота – 25,5 годин.

Література, що рекомендується [5–7, 19, 20, 23, 25, 29, 32, 33–37]

Дисципліни, що забезпечують: Теоретичні основи електротехніки, інженерна механіка, основи теорії електричних апаратів, електричні апарати високої напруги, електричні апарати автоматики та керування, експлуатація електричних та електронних апаратів.

3. КОНТРОЛЬНА РОБОТА

Відповідно до навчального плану студенти, що навчаються за заочною формою, впродовж семестру виконують контрольну роботу. Контрольна робота містить 4 задачі і виконується в окремому зошиті. Рішення задач повинно супроводжуватись схемами, рисунками, формулами з розкриттям величин, що входять до неї, а також конкретними розрахунками з підстановкою чисельних значень і з відповідними поясненнями. Контрольна робота подається викладачу на рецензію, при негативній рецензії необхідно урахувати всі зауваження і у тому ж зошиті внести відповідні корективи. Зробити це потрібно після підпису рецензента, а не виправляти саму контрольну роботу.

3.1 Задача №1

Визначити параметри ємнісно-омічного дільника напруги (ДН) для вимірювального пристрою, схема якого надана на рис. 3.1, де R_1 , R_2 , C_1 , C_2 – параметри ДН; r_1 , r_2 – резистори, що призначені для обмеження струмів при зрізах напруги; $Z_{\text{л}}$ – хвильовий опір лінії передачі вимірювального сигналу.

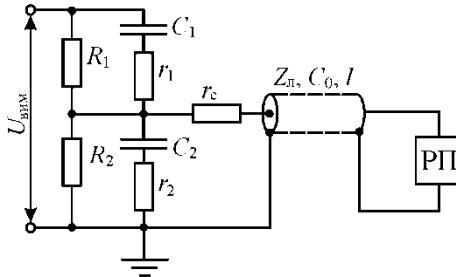


Рисунок 3.1 – Схема вимірювального пристрою з ємнісно-омічним ДН.

Схема містить також узгоджувальний резистор r_c призначений для усунення спотворень обумовлених хвильовими процесами в лінії.

Вихідні дані для вирішення задачі надані у таблицях 3.1 та 3.2.

Методичні вказівки: Параметри ДН вибираються виходячи з заданого коефіцієнта ділення за таким співвідношенням:

$$n = \frac{C_2}{C_1} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{r_1}{r_2}.$$

Таблиця 3.1 – Вихідні дані до задачі 1

Остання цифра індивідуального шифру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Коефіцієнт ділення, n	1×10^3	4×10^2	2×10^2	2×10^3	1×10^2	1×10^5	5×10^3	4×10^3	5×10^2	5×10^4

Таблиця 3.2 – Вихідні дані до задачі 1

Передостання цифра індивідуального шифру	Довжина лінії, l , м	Хвильовий опір лінії, $Z_{\text{л}}$, Ом	Погонна ємність лінії, C_0 , пФ/м
1	50	175	25
2	20	150	34
3	25	100	50
4	100	75	68
5	10	50	100
6	250	125	34
7	55	200	25
8	75	225	34
9	15	250	50
0	35	275	68

Опір низьковольтного плеча R_2 повинен бути як мінімум на два порядки перевищувати хвильовий опір лінії $Z_{\text{л}}$.

Ємність низьковольтного плеча C_2 повинна бути в 50–100 разів більше сумарної ємності лінії. $C_{\text{л}} = C_0 l$.

Величина демпфувального резистору r_2 вибирається такою, щоб мінімум на два порядки була меншою за хвильовий опір лінії $Z_{\text{л}}$.

Величина узгоджувального резистору $r_{\text{с}}$ повинна дорівнювати хвильовому опору лінії з урахуванням вхідного опору ДН, тобто

$$r_{\text{с}} = Z_{\text{л}} - r_2$$

Приклад вирішення: Вихідні дані:

- коефіцієнт ділення – $n = 5 \cdot 10^3$;
- довжина лінії – $l = 250$ м;
- хвильовий опір лінії – $Z_{\text{л}} = 75$ Ом;

• погонна ємність лінії – $C_0 = 50 \frac{\text{пФ}}{\text{м}}$.

Відповідно до рекомендацій [12,13] ємність низьковольтного плеча повинна бути у 50–100 разів більша за сумарну ємність лінії. Отже, сумарна ємність лінії буде складати:

$$C_n = C_0 l = 50 \cdot 250 = 12500 \text{ пФ} = 0,0125 \text{ мкФ}.$$

Відповідно, ємність низьковольтного плеча може бути обрана у межах:

$$C_2 = (50 \dots 100) \cdot 0,0125 = (0,625 \dots 1,25) \text{ мкФ}.$$

Остаточню вибирається: $C_2 = 1 \text{ мкФ}$.

Ємність високовольтного плеча вибирається виходячи з заданого коефіцієнта ділення

$$C_1 = \frac{C_2}{n} = \frac{1}{5 \cdot 10^3} = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ мкФ} = 200 \text{ пФ}.$$

Відповідно до рекомендацій [12,13], опір низьковольтного плеча повинен, як мінімум, на 2 порядки перевищувати хвильовий опір лінії. Отже:

$$R_2 \geq Z_n \cdot 10^2 = 75 \cdot 10^2 = 7500 \cdot \text{Ом} = 7,5 \text{ кОм}.$$

Остаточню вибирається: $R_2 = 10 \text{ кОм}$.

Опір високовольтного плеча вибирається виходячи з заданого коефіцієнта ділення

$$R_1 = R_2 \cdot n = 10 \cdot 5 \cdot 10^3 = 50 \cdot 10^3 \text{ кОм} = 50 \text{ МОм}.$$

Відповідно до рекомендацій, опір демпфувального резистора низьковольтного плеча повинен бути, як мінімум, на два порядки менше за хвильовий опір лінії. Отже:

$$r_2 \leq Z_n \cdot 10^{-2} = 75 \cdot 10^{-2} = 0,75 \cdot \text{Ом}$$

Остаточню вибирається: $r_2 = 0,5 \text{ Ом}$.

Опір демпфувального резистора високовольтного плеча вибирається виходячи з заданого коефіцієнта ділення:

$$r_1 = r_2 \cdot n = 0,5 \cdot 5 \cdot 10^3 = 2,5 \cdot 10^3 \text{ кОм} = 2,5 \text{ кОм}.$$

Величина узгоджувального резистора вибирається таким, що дорівнює хвильовому опору лінії з урахуванням вхідного опору ДН:

$$r_c = Z_n - r_2 = 75 - 0,5 = 74,5 \text{ Ом}.$$

Таким чином, для заданих умов вибрано такі параметри ДН:

$$R_1 = 50 \text{ МОм}; R_2 = 10 \text{ кОм}; C_1 = 200 \text{ пФ}; C_2 = 1 \text{ мФ};$$

$$r_1 = 2,5 \text{ Ом}; r_2 = 0,5 \text{ Ом}; r_c = 74,5 \text{ Ом}.$$

3.2 Задача №2

Визначити параметри обладнання для випробування ізоляції апарата відносно землі повним грозовим імпульсом та напругою промислової частоти. Клас напруги ізоляції надається у таблиці 3.3, інші дані – у таблиці 3.4.

Таблиця 3.3 – Клас напруги ізоляції апарата.

Остання цифра індивідуального шифру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Клас напруги, кВ	3	6	10	20	35	110	220	330	500	750

Таблиця 3.4 – Вихідні дані до задачі №2

Передостання цифра індивідуального шифру	Сумарна ємність на виході C_2 , пФ	Позначення грозового імпульсу
1	1500	1,2/50
2	1200	1,5/40
3	400	2,0/60
4	2500	2,5/75
5	650	1,8/55
6	1750	2,2/45
7	2000	1,2/50
8	800	1,5/40
9	3000	2,0/60
0	3500	2,5/75

Методичні вказівки: Випробування ізоляції електричних апаратів та іншого електроустаткування здійснюється напругою промислової частоти та імпульсною напругою, зокрема повним грозовим імпульсом, що має вигляд наданий на рисунку 3.2.

Основними параметрами грозового імпульсу є:

- *величина випробної напруги*, що відповідає максимальному миттєвому значенню імпульсу (точка F);

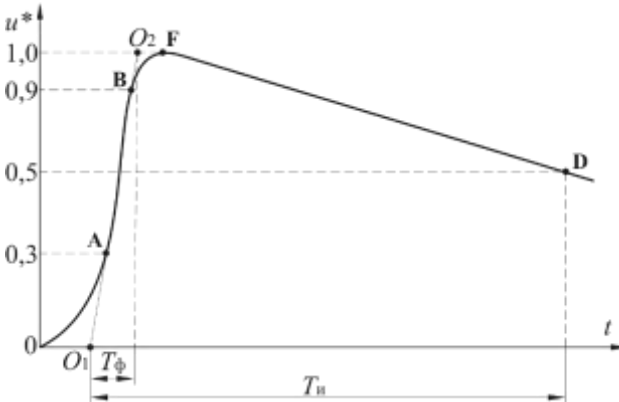


Рисунок 3.2 – Параметри повного грозового імпульсу

- *тривалість фронту* T_ϕ , що являє собою проміжок часу між умовним початком імпульсу (точка O_1) і моментом часу, що відповідає точці перетинання продовження лінійної ділянки (відрізок AB) з віссю, що відповідає випробній напрузі (точка O_2);

- *тривалість імпульсу* T_i визначається як інтервал часу між умовним початком імпульсу O_1 і моментом на спаді, що відповідає половині випробної напруги (точка D).

Стандартний повний грозовий імпульс має позначення: 1,2/50, де перша цифра означає $T_\phi = 1,2$ мкс, друга $T_i = 50$ мкс.

Для генерації грозових та комутаційних імпульсів за звичаєм використовують так звані *генератори імпульсної напруги (ГІН)*, що представляють собою систему конденсаторів, які протягом відносно тривалого відрізка часу заряджаються при паралельному з'єднанні, а потім, при послідовному з'єднанні, швидко розряджаються на навантаження, тобто на об'єкт, що випробується.

Реальні схеми ГІН можна звести до універсальної схеми заміщення, наданій на рисунку 3.3. В ній C_1 являє собою ємність "в ударі" ($C_1 = C/n$), C_2 – ємність на виході ГІН, R_2 – еквівалентний опір, що враховує опір об'єкту, а також вимірювальних і захисних елементів і визначає тривалість грозового імпульсу. Опір R_1 визначає тривалість фронту грозового імпульсу. Індуктивність L_n визначає індуктивність розрядної петлі.

Напруга на C_2 у загальному випадку має вигляд:

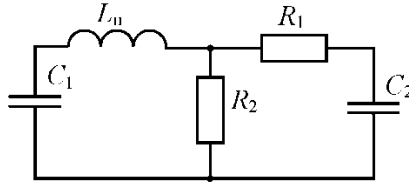


Рисунок 3.3 – Схема заміщення розрядного контуру ГІН

$$U_2 = \eta \cdot U_1(0) \cdot \left(e^{-\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right), \quad (3.1)$$

де $U_1(0)$ – напруга на C_1 перед початком розряду;

η – коефіцієнт, що враховує зниження максимальної напруги імпульсу по відношенню до напруги на C_1 у відповідний момент часу; для ГІН практично завжди можна використовувати вираз:

$$U_{2\max} = \eta \cdot U_1(0), \quad (3.2)$$

$$\text{де } \eta = \frac{C_1}{C_1 + C_2}; \quad (3.3)$$

τ_1 та τ_2 – постійні часу, що визначають основні параметри ГІН, що для грозових імпульсів; вони можуть бути визначені з наступних виразів [17]:

$$T_\phi = (3,15 - 6,7 \frac{T_\phi}{T_{\text{и}}}) \cdot \tau_2; \quad T_{\text{и}} = (0,7 + 1,7 \frac{T_\phi}{T_{\text{и}}}) \cdot \tau_1, \quad (3.4)$$

$$\text{де } \tau_1 = R_2(C_1 + C_2); \quad \tau_2 = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} R_1 \quad (3.5)$$

Таким чином, при заданих параметрах ГІН: величині випробної напруги $U_{\text{випр}} = U_{2\max}$, тривалості фронту T_ϕ і тривалості імпульсу $T_{\text{и}}$, а також ємності навантаження C_2 , відповідно до виразів (3.2)–(3.5) може бути зроблено розрахунок параметрів і вибір елементів ГІН. Ємність "в ударі" може бути обрана у межах $C_1 = (5 \dots 15) C_2$ [17].

Випробна *напруга промислової частоти* являє собою напругу синусоїдальної форми частотою $50 \pm 0,5$ Гц. Величина випробної напруги відповідає її діючому значенню. Схема випробування ізоляції напругою промислової частоти надана на рис. 3.4.

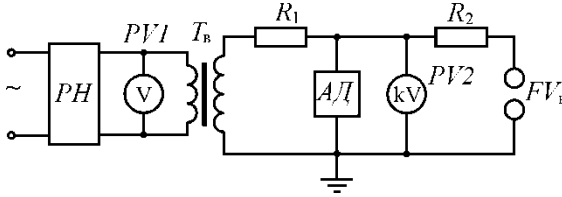


Рисунок 3.4 – Схема випробування ізоляції напругою промислової частоти.

Основним елементом схеми є регульоване джерело високої напруги, яке містить: регулятор напруги РН, який забезпечує регулювання амплітуди, частоти та фази випробної напруги, а також *випробний трансформатор* $T_{\text{в}}$. Схема містить також вимірювальні пристрої, які забезпечують контроль первинної $PV1$, та високої $PV2$ напруг. Паралельно до апарата, що випробується AD , підключається вимірювальний розрядник FV через струмообмежувальний резистор R_2 . Розрядник забезпечує захист випробуваного апарата від випадкового підвищення напруги більше за випробну. Пробивна напруга розрядника за звичаєм обирається на 20–30% більшою за випробну. Резистор R_1 служить для обмеження струму у випадку пробою або перекриття ізоляції апарата, що випробується, до небезпечного для випробного трансформатора значення.

При відносно невисоких (до 10^5 В) напругах у якості випробного трансформатора частіше всього використовується малопотужний силовий підвищувальний трансформатор або трансформатор напруги. Багатьма закордонними фірмами виготовляються спеціальні випробні трансформатори.

Потужність випробного трансформатора обирається в залежності від розрядної потужності випробуваних апаратів:

$$S = 10^{-9} \omega C_2 U^2, \text{ кВА},$$

де C_2 – вихідна ємність, [пФ];

U – величина випробної напруги, [кВ];

ω – кутова частота випробної напруги, с^{-1} .

Приклад вирішення: Вихідні дані:

- клас напруги – $U_{\text{н}} = 35 \text{ кВ}$;
- сумарна ємність на виході – $C_2 = 1750 \text{ пФ}$;
- позначення грозового імпульсу – 1,2/50.

Відповідно до позначення грозового імпульсу, його параметри мають такі значення:

- тривалість фронту – $T_{\phi} = 1,2$ мкс ;
- тривалість імпульсу – $T_{и} = 50$ мкс .

Відповідно до класу напруги 35 кВ величина випробної напруги відносно землі для випробування зовнішньої ізоляції повним грозовим імпульсом складає 185 кВ [22]. Виходячи з величини ємності на виході ГІН C_2 , визначається ємність “в ударі”, яка відповідно до рекомендацій [17] може бути обрана у межах:

$$C_1 = (5 \dots 15) C_2 = (5 \dots 15) \cdot 1750 = (8750 \dots 26250) \text{ пФ}.$$

Остаточню вибирається $C_1 = 20000 \text{ пФ}$.

Виходячи з величини випробної напруги, яка відповідає максимальному миттєвому значенню повного грозового імпульсу ($U_{2\max} = 185 \text{ кВ}$), визначається напруга на ємності C_1 перед початком розряду

$$U_1(0) = \frac{U_{2\max}}{\eta},$$

де η – коефіцієнт, що враховує зниження максимальної напруги імпульсу по відношенню до напруги на ємності C_1 на початку розряду, який можна розрахувати за таким виразом:

$$\eta = \frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{20000}{20000 + 1750} = 0,92.$$

$$\text{Отже: } U_1(0) = \frac{185}{0,92} = 201,2 \text{ кВ}$$

Для визначення параметрів розрядного контуру ГІН визначаємо спочатку відповідні постійні часу

$$\tau_1 = \frac{T_{и}}{0,7 + 1,7 \frac{T_{\phi}}{T_{и}}} = \frac{50}{0,7 + 1,7 \frac{1,2}{50}} = 67,495 \text{ мкс}$$

$$\tau_2 = \frac{T_{\phi}}{3,15 - 6,7 \frac{T_{\phi}}{T_{и}}} = \frac{1,2}{3,15 - 6,7 \frac{1,2}{50}} = 0,4 \text{ мкс}$$

Параметри розрядного контуру ГІН визначаються за наступними виразами:

$$R_2 = \frac{\tau_1}{C_1 + C_2} = \frac{67,495 \cdot 10^{-6}}{(20000 + 1750) \cdot 10^{-12}} = 31032 \text{ Ом} \approx 3,1 \text{ кОм};$$

$$R_1 = \tau_2 \frac{C_1 + C_2}{C_1 \cdot C_2} = 0,4 \cdot 10^{-6} \frac{(20000 + 1750) \cdot 10^{-12}}{20000 \cdot 10^{-12} \cdot 1750 \cdot 10^{-12}} \approx 0,25 \text{ кОм}.$$

Відповідно до класу напруги 35 кВ величина випробної напруги відносно землі для випробування зовнішньої ізоляції напругою промислової частоти складає 105 кВ для випробування у сухому стані і 85 кВ під дощем [22].

Виходячи з більшого з цих значень, а також враховуючи ємність на виході C_2 , визначається потужність випробувального трансформатора

$$S_{\text{тр}} = 10^{-9} \omega C_2 U_b^2 = 10^{-9} \cdot 314 \cdot 1750 \cdot 105^2 = 6,058 \text{ кВА}.$$

Остаточно вибираємо найближче більше значення зі стандартного ряду номінальних потужностей $S_{\text{тр}} = 6,3 \text{ кВА}$; $U_n = 110 \text{ кВ}$.

3.3 Задача №3

Визначити параметри одночастотного коливального контуру для однофазних комутаційних випробувань високовольтного вимикача, схема якого надана на рис. 3.5. Клас напруги вимикача надається у таблиці 3.3, інші дані – у таблиці 3.5.

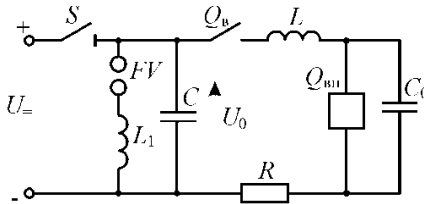


Рисунок 3.5 – Схема коливального контуру.

Методичні вказівки: З огляду на те, що $R \approx 0$, частота струму у коливальному контурі визначається з такого виразу

$$\omega = 2\pi f = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Параметри коливального контуру вибираються таким чином, щоб частота f дорівнювала промисловій. Максимальне значення струму в колі буде дорівнювати:

$$I_m = \frac{U_0}{\omega L}$$

Таблиця 3.5 – Вихідні дані до задачі №3.

Передостання цифра індивідуального шифру	Номинальний струм вимикання $I_{0.ном}$, кА	Частота ПНВ, f_0 , кГц
1	20	5
2	31,5	8
3	40	10
4	40	12
5	63	15
6	63	18
7	20	22
8	20	25
9	31,5	32
0	31,5	40

Після згасання дуги на контактах випробуваного вимикача починає поновлюватись напруга:

$$u_b = U_m \frac{C}{C + C_0} (1 - \cos \omega_0 t)$$

де C_0 – ємність конденсаторної батареї, що забезпечує нормовані параметри перехідної поновлюваної напруги; в даному випадку вона обирається відповідно до заданої частоти ППН:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}}.$$

Приклад вирішення: Вихідні дані:

- клас напруги вимикача – $U_n = 110 \text{ кВ}$;
- номінальний струм вимикання – $I_{0.ном} = 40 \text{ кА}$;
- частота перехідної поновлюваної напруги – $f_0 = 15 \text{ кГц}$.

Індуктивність коливального контуру визначається за законом Ома

$$I_{0.ном} = \frac{U_0}{\sqrt{2\omega L}},$$

де U_0 – поновлювана напруга промислової частоти;

ω – кутова частота коливального контуру, яка повинна відповідати промисловій частоті:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 50 = 31416 \frac{1}{\text{с}}.$$

Поновлювана напруга промислової частоти повинна відповідати напрузі на першому гасильному полюсі в момент переходу струму через нульове значення. За таких умов зарядна напруга конденсаторної батареї C повинна складати:

$$U_0 = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot U_n = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot 110 = 134,72 \text{ кВ};$$

Таким чином, величина індуктивності коливального контуру:

$$L = \frac{U_0}{\sqrt{2} \cdot \omega \cdot I_{0, \text{ном}}} = \frac{134,72}{\sqrt{2} \cdot 314,16 \cdot 40} = 0,00758 \text{ Гн}.$$

З огляду на те, що активний опір коливального контуру дуже малий, ємність коливального контуру визначається без його урахування, тобто:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Таким чином, ємність конденсаторної батареї, що забезпечує напівхвилю струму промислової частоти, буде складати:

$$C = \frac{1}{\omega^2 L} = \frac{1}{314,16^2 \cdot 0,00758} = 0,0013366 \text{ Ф} \approx 1,34 \text{ мФ}.$$

Частота перехідної поновлюваної напруги без урахування активного опору коливального контуру буде відповідати наступному виразу:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}}$$

Таким чином, ємність конденсаторної батареї, що задає частоту перехідної поновлюваної напруги буде складати:

$$C_0 = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 L} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 15000^2 \cdot 0,00758} = 1,485 \cdot 10^{-8} \text{ Ф} \approx 14,8 \text{ нФ}.$$

Отже, для проведення однофазних комутаційних випробувань високовольтного вимикача з заданими параметрами, коливальний контур повинен мати такі параметри:

$$U_0 \approx 134,7 \text{ кВ}; L \approx 7,58 \text{ мГн}; C \approx 1,34 \text{ мФ}; C_0 \approx 14,8 \text{ нФ}.$$

3.4 Задача №4

Визначити параметри трифазного випробного контуру для прямих комутаційних випробувань апаратів керування, схема якого нада-

на на рис. 3.6. Номінальний робочий струм апарата надається у таблиці 3.6, інші дані – у таблиці 3.7.

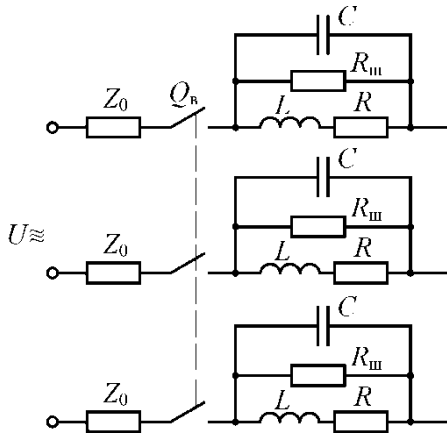


Рисунок 3.6 – Трифазний випробний контур для умов комутації струмів навантаження і перевантаження.

Таблиця 3.6 – Вихідні дані до задачі №4.

Остання цифра індивідуального шифру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номінальний робочий струм, А	25	100	400	160	630	10	16	320	250	63

В контурі індуктивність L , резистор з активним опором R , ємність C та шунтувальний резистор $R_{\text{ш}}$ імітують навантаження, що забезпечує задані параметри випробного контуру. Z_0 – обмежувальний опір, що включається безпосередньо перед випробуванням апаратом $Q_{\text{в}}$.

Методичні вказівки: Сумарна індуктивність і сумарний активний опір випробного контуру з урахуванням опору Z_0 будуть визначатися за такими виразами:

$$R = \frac{U_0}{\sqrt{3} \cdot I_0} \cdot \cos \varphi_0; \quad L = \frac{U_0}{\sqrt{3} \omega I_0} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_0},$$

де I_0 – діюче значення струму, що комутується;

U_0 – поновлювана напруга промислової частоти;

$\cos\varphi_0$ – коефіцієнт потужності кола, що комутується.

Таблиця 3.7 – Вихідні дані до задачі №4.

Передостання цифра індивідуального шифру	Номінальна на- пруга, В	Категорія ви- користання	Режим комутацій
1	660	АС-4	нормальних
2	660	АС-2	нормальних
3	660	АС-1	рідких
4	380	АС-3	рідких
5	380	АС-3	нормальних
6	380	АС-1	нормальних
7	660	АС-4	рідких
8	660	АС-2	рідких
9	660	АС-1	нормальних
0	380	АС-3	нормальних

Параметри перехідної поновлюваної напруги на контактах досліджуваного апарата задаються двома параметрами: власною частотою f_0 та коефіцієнтом амплітуди κ_a і обираються в залежності від величини струму, що комутується і поновлюваної напруги промислової частоти. Їх розрахунок проводиться за наступними емпіричними формулами:

$$f_0 = A_0 \cdot I_0^{0,2} \cdot U_0^{-0,8} \pm 10 \text{ кГц};$$

$$\kappa_a = B_0 + C_0 \cdot \exp(-0,016 \cdot A_0 \cdot I_0^{0,2} \cdot U_0^{-0,8}) \pm 0,05.$$

Для "жорстких" умов $A_0 = 2600$; $B_0 = 1,15$; $C_0 = 0,5$.

Для "м'яких" умов $A_0 = 2000$; $B_0 = 1,1$; $C_0 = 0,4$.

Приблизно значення $R_{ш}$ і C випробного контуру можна оцінити за такими формулами:

$$R_{ш} = \frac{0,4 \cdot (4\pi^2 + m^2) f_0 \cdot L}{m}, \text{ Ом}; \quad C = \frac{1,4}{4(\pi^2 + m^2) f_0 \cdot L}, \text{ Ф},$$

$$\text{де } m = 2 \cdot \ln\left(\frac{1}{\kappa_a - 1}\right); \quad U_0 = \sqrt{\frac{3}{2}} U_{н}$$

Приклад вирішення: Вихідні дані:

- номінальний робочий струм – $I_{н,р} = 160 \text{ А}$;
- номінальна напруга – $U_{н} = 380 \text{ В}$;
- категорія використання – АС-3.

Для визначення параметрів випробного контуру для проведення комутаційних випробувань необхідно спочатку визначити параметри кола, що комутується:

- $U_{н0}$ – напруга кола, що комутується;
- I_0 – струм, що комутується;
- $\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності кола, що комутується.

Відповідно до державного стандарту України [23] параметри кола, що комутується, для заданої категорії використання та заданого режиму нормальних комутацій складають:

а) при вмиканні:

$$U_{н0} = U_n = 380 \text{ В}; I_0 = 6I_{н.р} = 960 \text{ А}; \cos\varphi = 0,35;$$

при вимиканні:

$$U_{н0} = 0,17U_n = 64,6 \text{ В}; I_0 = 6I_{н.р} = 960 \text{ А}; \cos\varphi = 0,35;$$

Параметри випробного контуру, які забезпечують ці параметри, визначаються за наступними виразами:

$$R = \frac{U_{н0}}{\sqrt{3} \cdot I_0} \cdot \cos\varphi; \quad L = \frac{U_{н0}}{\sqrt{3} \cdot \omega I_0} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}$$

При вмиканні кола вони повинні складати:

$$R = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 960} \cdot 0,35 = 0,08 \text{ Ом};$$

$$L = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 314,16 \cdot 960} \cdot \sqrt{1 - 0,35^2} = 6,81 \cdot 10^{-4} = 0,68 \text{ мГн}.$$

При вимиканні кола:

$$R = \frac{64,6}{\sqrt{3} \cdot 960} \cdot 0,35 = 0,0136 \text{ Ом};$$

$$L = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 314,16 \cdot 960} \cdot \sqrt{1 - 0,35^2} = 1,156 \cdot 10^{-4} = 0,1156 \text{ мГн}.$$

При випробуваннях в режимі вимикання електричного кола потрібно також забезпечити відповідні параметри перехідної поновлюваної напруги, які задаються власною частотою f_0 та коефіцієнтом амплітуди k_a . Вони визначаються за емпіричними формулами, які надаються державним стандартом [23]:

$$f_0 = A_0 \cdot I_0^{0,2} \cdot U_0^{-0,8} \pm 10 \text{ кГц};$$

$$\kappa_a = B_0 + C_0 \cdot \exp(-0,016 \cdot I_0^{0,2} \cdot U_0^{-0,8}) \pm 0,05,$$

де A_0 , B_0 , C_0 – константи, які для “жорстких” умов відповідно складають: $A_0 = 2600$, $B_0 = 1,15$; $C_0 = 0,5$.

U_0 – поновлювана напруга промислової частоти; для трифазної системи з заземленою нейтраллю відносно першого гасильного полюсу вимикача вона складає:

$$U_0 = \sqrt{\frac{3}{2}} U_{н0} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot 64,6 = 79,12 \text{ В}$$

Отже, параметри перехідної поновлюваної напруги:

$$f_0 = 2600 \cdot 0,96^{0,2} \cdot 79,12^{-0,8} = 78 \text{ кГц}$$

$$\kappa_a = 1,15 + 0,5 \cdot \exp(-0,016 \cdot 2600 \cdot 0,96^{0,2} \cdot 79,12^{-0,8}) = 1,29$$

Параметри випробного кола, що визначають параметри перехідної поновлюваної напруги попередньо визначаються за такими формулами [23]:

$$R_{ш} = \frac{0,4(4\pi^2 + m^2)f_0 L}{m}; \quad C = \frac{1,4}{4(\pi^2 + m^2)f_0^2 L},$$

$$\text{де } m = 2 \ln \frac{1}{\kappa_a - 1} = 2 \cdot \ln \frac{1}{1,29 - 1} = 2,453.$$

Отже параметри випробного контуру, що забезпечують параметри перехідної поновлюваної напруги будуть складати:

$$R_{ш} = \frac{0,4 \cdot (4\pi^2 + 2,453^2) \cdot 78 \cdot 0,1156}{2,453} = 66 \text{ кОм}$$

$$C = \frac{1,4}{4 \cdot (\pi^2 + 2,453^2) \cdot 78^2 \cdot 0,1156} = 0,038 \text{ мкФ}$$

ЛІТЕРАТУРА

1. Корягін М. В. Основи наукових досліджень : навч. посібник / М. В. Корягін, М. Ю. Чік. – 2-ге видання, стереотипне. – К.: Алерта, 2017. – 622 с.
2. Колесников О. В. Основи наукових досліджень. 2-ге вид. випр.. та доп. Навч. посіб.– К.: Центр учбової літератури, 2011. – 144 с.
3. Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П. Планирование эксперимента в электромеханике. – М.: Энергия, 1975. – 184 с.
4. Барабашук В.И., Креденцер Б.П., Мирошниченко В.И. Планирование эксперимента в технике/ Под ред. Б.П. Креденцера. – К.: Техніка, 1984. – 200 с.
5. Петин О.В., Щербаков Е.Ф. Испытание электрических аппаратов. – М.: Высшая школа, 1985. – 215 с.
6. Намиток К.К. Испытания аппаратов низкого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
7. Образцов В.А. Контрольные испытания низковольтных аппаратов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 224 с.
8. Каплан В.В., Нашатырь В.М. Синтетические испытания высоковольтных выключателей. – М.: Энергия, 1980.– 200 с.
9. Бажанов С.А., Воскресенский В.Ф. Профилактические испытания изоляции оборудования высокого напряжения. – М.: Энергия, 1977. – 288 с.
10. Бажанов С.А. Выбор аппаратуры для испытаний электрооборудования. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 128 с.
11. Федченко И.К. Техника высоких напряжений: Испытательные установки и методы испытания выключающих аппаратов высокого напряжения. К.: Вища школа, 1969. – 544 с.
12. Кужекин И.П. Испытательные установки и измерения на высоком напряжении. – М.: Энергия, 1980. – 136 с.
13. Болотин И.Б., Эйдель Л.З. Измерения при испытании аппаратов в режимах короткого замыкания. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 200 с.
14. Пичугина М.Т. Высоковольтная электротехника: Учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 120 с.
15. Щеглов Н.В. Измерения на высоком напряжении: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 122 с.
16. Техника высоких напряжений/ И.М. Богатенков, Ю.Н. Боча-

ров, Н.И. Гумерова и др.; под ред. Г.С. Кучинского. – СПб: Энергоатомиздат, 2003 – 608 с.

17. Смирнов С.М., Терентьев П.В. Генераторы импульсов высокого напряжения. – М-Л.: Энергия, 1964. – 240 с.

18. Шнейдер Г.Я. Электрическая изоляция трансформаторов высокого напряжения. – М.: Знак, 2009. – 160 с.

19. Близняков О.В. Дослідження та випробування електричних апаратів: навчальний посібник. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2013. – 126 с.

20. Норми випробування електрообладнання. СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. Видання офіційне/ Київ, Міністерство палива та енергетики України Об'єднання енергетичних підприємств «Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики». – 2007. – 271 с.

21. ГОСТ 1516.2-97. Межгосударственный стандарт: Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции. – Минск: Издательство стандартов, 1998. – 35 с.

22. ГОСТ 1516.3-96. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. (Переиздание, 2003 г.).

23. ДСТУ 2993-95. Апарати електричні низьковольтні. Методи випробувань. – К.: Держстандарт України, 1995. – 32 с.

24. Wadhwa C. L. High Voltage Engineering (second edition)/ Published by New Age International (P) Ltd., Publishers, 2007. – 312 p.

25. Garzon, R. High Voltage Circuit Breakers: Design and Applications. Second Edition, Revised and Expanded. Marcel Dekker, New York–Basel, 2002. – 473 p.

26. High voltage engineering and testing, 3rd Edition / Edited by Hugh M. Ryan, The Institution of Electrical Engineers, 2013.

27. Browne T.E. Circuit Interruption: Theory and Techniques / New York and Basel: Marcel Dekker, 1984. – 701 p.

28. IEC 60060:2020 SER. High-voltage test techniques – ALL PARTS, 2020. – 331 p.

29. IEC 60214-1:2014. Tap-changers – Part 1: Performance requirements and test methods, 2nd edition, 2014. – 156 p.

30. IEC 60270: 2000. High-voltage test techniques – Partial discharge measurements, 3rd edition, 2000. – 99 p.

31. IEC 60688: 2012. Electrical measuring transducers for convert-

ing A.C. and D.C. electrical quantities to analogue or digital signals, 3rd edition, 2012. – 82 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 61869-2: 2012. Instrument transformers – Part 2: Additional requirements for current transformers, 1st edition, 2012. – 140 p.

36. IEC 61869-3: 2011. Instrument transformers – Part 3: Additional requirements for inductive voltage transformers, 1st edition, 2011. – 56 p.

37. IEC 60099-4: 2014. Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems, 3rd edition, 2014. – 353 p.