

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

В.В.Зіновкін

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ З ДИСЦИПЛІНИ

«МЕТОДИ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ»
(для студентів усіх форм навчання)

спеціальність 173:

– Авіоніка

освітня програма 17:

- Електротехнічні комплекси та системи літальних апаратів

Інститут, факультет: Інженерно-фізичний інститут,
Електротехнічний факультет

Конспект лекцій з дисципліни «Методи надійності технічних систем» спеціальність: 173 – Авіоніка, освітня програма 17: - Електротехнічні комплекси та системи літальних апаратів. (для студентів усіх форм навчання) Інженерно-фізичний інститут, Електротехнічний факультет./ Укл. В.В. Зіновкін. - Запоріжжя. НУ «Запорізька політехніка», 2022. - 97 с.

Укладачі: В.В.Зіновкін, проф., д.т.н.

Рецензент: Ю.О.Крисан, доц., к.т.н.

Відповідальний за випуск: А.В.Пирожок, доц., к.т.н.

Затверджено на засіданні кафедри ЕПА
Протокол № 11 від 10.06.2022 р.

Рекомендоване до видання НМК ЕТФ
Протокол № 6 від 23.06 2022 р.

ЗМІСТ

Введення	5
1 Методологічні основи надійності механічних систем	6
1.1 Методи систематизації і лінеаризації нелінійних залежностей.....	6
1.2. Метод осереднення серії експериментальних даних.....	8
1.3 Метод найменших квадратів.....	9
1.4 Оцінка надійності систем при періодичному навантаженні.....	10
1.5 Структурна надійності складних систем.....	13
1.6. Приклади побудови схем розрахунку надійності.....	16
1.7. Резервування.....	21
1.8 Оптимізація показників надійності електромеханічних систем	23
1.9 Розрахунок надійності резервованих систем.....	27
1.10 Статистична оцінка результатів випробувань на надійність.....	30
1.11 Методи планування проведення випробувань.....	32
1.12 Емпіричні показники основних параметрів надійності	34
1.13 Узгодженість теоретичних і експериментальних законів розподілу.....	36
1.14 Ефективність електромеханічних систем.....	45
1.15 Надійність технологічного процесу виготовлення електромеханічних систем.....	52
1.16 Діагностика електромеханічних систем.....	55
1.17 Класифікація алгоритмів та систем діагностування	58
1.18 Структура діагностуючих пристроїв.....	60

1.19 Методологічні підходи дослідження і діагностики електромеханічних систем.....	62
1.20 Спеціалізований дослідження навантажень електромеханічних систем	65
1.21 Спеціалізований пристрій аналізу і класифікації параметрів навантаження.....	68
1.22 Комп'ютерне моделювання сукупності параметрів навантажень обладнанні.....	73
1.23 Приклад програми автоматизованого аналізу технічного стану обмоток трансформаторного обладнання.....	75
1.24 Приклад діагностики обмоток трансформаторного обладнання по поточному аналізу навантаження.....	83
1.25 Діагностика технічного стану обладнання по спектру октавних частот звукової потужності.....	89
Перелік використаних джерел	93

ВВЕДЕННЯ

Надійність і діагностика технічних систем і іншого електротехнічного обладнання відіграють важливу роль в промисловості. Вони дозволяють упередити пошкодження і аварійні виходи із ладу обладнання. Проектування електромеханічних об'єктів здійснюється з умови забезпечення надійної роботи при номінальних параметрах навантаження. На практиці використовуються декілька методів діагностики технічного стану обладнання в основі яких використовуються новітні мікропроцесорні і програмні засоби автоматизованого аналізу електромагнітних параметрів. До них відносяться параметри різної фізичної природи такі як струм, напруга, потужність, частота, загальні рівні звуку і в спектрі октавних частот, вібрації, рівні розрядів, реактивні опори та ін. Вони дозволяють встановити поточний технічний стан технічних систем, визначити початкові відхилення в конструкції і прийняти відповідні оперативні рішення по упередженню виходу із ладу та зриву технологічного процесу промислових комплексів. Отримання достовірної інформації потребує використання досить складних математичних моделей які здатні обробляти досить великі обсяги поточної інформації. Тому при інженерній практиці електромеханічних систем використовуються програмні засоби з використанням методів візуалізації і автоматизованого відключення обладнання від мережі живлення у випадку досягнення критичного технічного стану.

Особливу актуальність ці питання набувають в технічних системах авіаційної промисловості та космічних технічних системах. При вирішенні питань діагностики на стадії проектування і розробки таких систем необхідно враховувати вплив не тільки внутрішніх чинників але і зовнішніх. В деяких умовах функціонування технічних систем зовнішні фактори можуть бути вирішальними.

Тому майбутнім фахівцям доцільно опанувати певні методи надійності і діагностики з врахуванням нелінійних залежностей між певними параметрами при збереженні фізичного тлумачення і прийняття оптимальних технічних рішень забезпечення надійної роботи електромеханічних систем в умовах експлуатації.

1 МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

В процесі наукового дослідження і вирішенні практичних задач літальних об'єктів з метою отримання інформації про поточний технічний стан важливо встановити взаємні залежності між фізичними параметрами, які протікають в електромеханічній системі або об'єкті. На практиці використовуються різні методи дослідження і діагностики обладнання і пристроїв різного технічного обладнання [1-22]. Особливої актуальності набувають ці питання для складних механічних систем і літальних об'єктів. Коротко розглянемо основні теоретичні і практичні методи визначення технічного стану і діагностики складних електромеханічних систем.

1.1 Методи систематизації і лінеаризації нелінійних залежностей

На практиці переважна кількість залежностей між параметрами навантаження (електричні: - струм, напруга, частота і механічні: - навантаження на вал та ін.), електромагнітними (електромагнітні: - поля, потоки, втрати, індуктивні зв'язки, потужність та ін.), електромеханічними (оберткові процеси, навантаження на вал машини, статична і динамічна стійкість та ін.) суттєво відрізняється від лінійних. Отримання достовірної інформації потребує використання досить складних математичних моделей при складанні яких практично не можливо враховувати цілу низку чинників і взаємних впливів. Останні, в свою чергу, потребують досить великого обсягу розрахунків, що не задовольняє вимогам практики. Тому при інженерних розрахунках і проектуванні електромеханічних систем використовуються математичні залежності з використанням певних напівемпіричних коефіцієнтів. Мета цих коефіцієнтів полягає в наближенні отриманих залежностей до таких, що дозволяють встановити чисельні значення параметрів (з достатньою для інженерної практики похибкою до 10%) і передбачити їх подальший розвиток при різних статичних і динамічних навантаженнях і фізичному моделюванні. Тому майбутнім фахівцям доцільно опанувати певні методи апроксимації

нелінійних залежностей лінійними з метою суттєвого скорочення інженерних розрахунків при збереженні фізичного тлумачення і прийняття оптимальних технічних рішень забезпечення надійної роботи електромеханічних систем в умовах експлуатації.

Проектування електромеханічних об'єктів здійснюється з умови забезпечення надійної роботи при номінальних параметрах навантаження (і дозволених нормативно-технічною документацією короткочасних перевантаженнях для загального призначення). При номінальному навантаженні доцільно використовувати степінну або показову функціональні залежності, що приведені вище. Постійні емпіричні коефіцієнти (a , b , m) отримують шляхом експериментального дослідження і вважається найбільш достовірним при визначенні показників надійності і діагностики.

Метод лінеарізації (прямої лінії) полягає в заміні будь-якої нелінійної залежності частковими лінійними і базується на геометричному тлумаченні лінійної залежності $\lambda = a + b \cdot \Theta$, що зручно при візуалізації. Слід відзначити, що такий підхід дозволяє апроксимувати любого виду нелінійну залежність з певною похибкою. Похибка залежить від вибраних меж в яких здійснюється лінеаризація. Зменшення похиби досягається шляхом зменшення меж лінеаризації, але, при цьому, зростає обсяг розрахунків

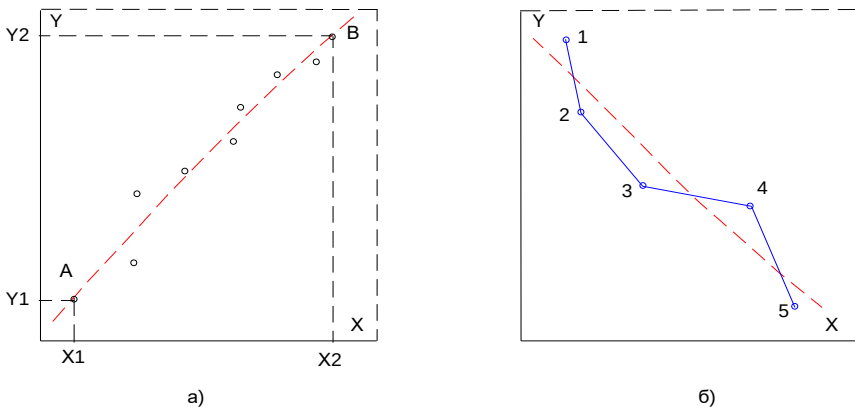


Рисунок 1.1 – Приклади визначення емпіричних коефіцієнтів шляхом лінеаризації а) і найменших квадратів б).

Розрахунки виконується в наступній послідовності:

- На підставі експериментальних досліджень будується певна графічна залежність. Потім вона апроксимується прямою лінією. Найбільш доцільно використовувати «кусову апроксимацію». Апроксимацію слід здійснювати таким чином, щоб кількість точок над і під прямою лінією була однакова. Приклад лінійної апроксимації певних залежностей показано на рис. 1.1а;

- На прямій обираються дві точки (на протилежних кінцях прямої) А і В та визначаються їх координати $A(x_1, y_1)$, $B(x_2, y_2)$;

- Складається система рівнянь, яка вирішується і дозволяє визначити коефіцієнти а і в. При цьому коефіцієнт (В) означає відстань прямої на осі (У) від початку системи координат, а (а) тангенс кута.

Ці тригонометричні параметри набувають певного фізичного тлумачення при вирішенні практичних задач, в тому числі: - надійності і діагностики електромеханічних систем. Відповідно до нашого прикладу ці рівняння доцільно представити в наступному вигляді:

$$a \cdot x_1 + b = y_1$$

$$a \cdot x_2 + b = y_2$$

Ці рівняння набувають фізичного тлумачення при визначенні надійності і діагностики складних електромеханічних систем та літальних об'єктів.

1.2 Метод осереднення серії експериментальних даних

Метод осереднення полягає в отриманні залежностей між певними параметрами електромеханічної системи шляхом урівноваження можливих експериментальних похибок (або інших не суттєвих впливів) типу $\Delta_i = y_i - ax_i$, які виникають при експериментальному дослідженні в значній кількості даних і призводять до деяких сумнівів при тлумаченні процесу, що заважає прийняттю оптимально технічного рішення. Такий підхід здійснюється в наступній послідовності:

- В залежності від характерних рис (п) значень експериментальних даних розподіляються приблизно порівну. На їх підставі складається наступна система рівнянь:

$$\sum_{i=1}^m (y_i - ax_i - b) = 0, \quad (1.1)$$

$$\sum_{i=m+1}^n (y_i - ax_i - b) = 0. \quad (1.2)$$

Вирішуючи приведену систему рівнянь знаходимо емпіричні коефіцієнти а) і в).

1.3. Метод найменших квадратів

Метод найменших квадратів доцільно розглянути на наступному прикладі. За результатами випробувань, при умові, що коефіцієнт навантаження менший в порівнянні з одиницею, отримані експериментальним шляхом значення функції випадкової величини 1, 2, 3, 4 та ін.

Необхідно визначити параметри апроксимуючого розподілу методом найменших квадратів.

Рішення задачі полягає в побудові графічної залежності реальної функції, як показано на рис. 21.б);

Додержуючись прийнятої умови (коефіцієнт навантаження менший від номінального), приведена залежність апроксимується лінійною функцією $z = a + vx$. Параметри цієї функції визначаються за допомогою методу найменших квадратів. Для цього слід мінімізувати наступне алгебраїчне рівняння:

$$A = \sum_{i=1}^5 (a + vx_i - y)^2 = \min, \quad (1.3)$$

де x_i, y_i – координати відповідних точок на графіку.

Чисельні значення коефіцієнтів а) і в) визначаються з рішення системи диференціальних рівнянь

$$\frac{dA}{da} = \sum_{i=1}^5 (a + vx_i - y_i) = 0 \quad (1.4)$$

$$\frac{dA}{db} = \sum_{i=1}^5 (a + vx_i - y_i) = 0 \quad (1.5)$$

Слід відзначити, що вирішення таких рівнянь доцільно здійснювати чисельними методами. Використання інших методів, що дозволяють отримати високу точність, не доцільно тому, що чисельні методи задовольняють вимогам інженерної практики.

1.4 Оцінка надійності систем при періодичному навантаженні

Більшість електромеханічних систем і об'єктів можливо віднести до класу систем періодичної дії. Ця система характеризується тим, що має наступні інтервали послідовності очікування, які задаються. Сумарна кількість відмов у заданому проміжку часу визначиться з наступної умови:

$$n = n_n + n_o + n_k, \quad (1.6)$$

де n_n – кількість відмов у номінальному режимі навантаження;
 n_o – кількість відмов у режимі очікування;
 n_k – кількість відмов у режимі комутації.

Тоді сумарна інтенсивність відмов визначиться за наступним рівнянням:

$$\lambda = \lambda_n \left(1 + A \frac{1 - \kappa_d}{\kappa_d} + BC \right), \quad (1.7)$$

де λ_n – інтенсивність відмов у номінальному режимі навантаження

$$\lambda_n = \frac{n_n}{t_n}, \quad (1.8)$$

де t_n – час номінального навантаження;

A – коефіцієнт, який враховує співвідношення режимів номінального та очікування

$$A = \frac{\lambda_o}{\lambda_n}, \quad (1.9)$$

де λ_o – інтенсивність відмов у режимі очікування

$$\lambda_o = \frac{n_o}{t_o}, \quad (1.10)$$

де t_o – тривалість режиму очікування;

κ_d – коефіцієнт періодичності дії

$$\kappa_d = \frac{t_n}{t_n}, \quad (1.11)$$

де t_n – календарна тривалість експлуатації;

t_n – коефіцієнт, який враховує співвідношення режимів номінального та комутації

$$B = \frac{\lambda_k}{\lambda_n}, \quad (1.12)$$

де λ_k – інтенсивність відмов у режимі комутації

$$\lambda_k = \frac{n_k}{k}, \quad (1.13)$$

де k – кількість комутацій;

$$C = \frac{k}{t_H}. \quad (1.14)$$

Коефіцієнти k_d і C можуть бути змінені обслуговуючим персоналом. Інші коефіцієнти постійні для даного типу об'єкта і їх числові значення залежать від складу комплектуючих елементів, режиму праці та конструктивного виконання об'єкта.

Якщо не враховувати режим комутації, то інтенсивність відмов можливо встановити по наступному рівнянні:

$$\lambda = \frac{\lambda_H t_H + \lambda_0 t_0}{t_H + t_0} \quad (1.15)$$

В промисловості і, особливо, в авіації використовуються досить складні електромеханічні системи і об'єкти. Їх принцип роботи полягає у взаємодії різних фізичних процесів в поєднанні з впливом зовнішніх та внутрішніх факторів. Тому розрахунки поточного технічного стану технічних систем здійснюються мікропроцесорними і програмними засобами автоматизації. Вони визначають ступінь впливу таких факторів і виробляють відповідні корегуючі дії.

Коротко розглянемо принципові основи надійності складних електромеханічних систем.

1.5 Структурна схема надійності складних систем

На практиці використовується досить велика кількість автоматизованих пристроїв, що здійснюють аналіз надійності технічних систем. В них використовуються різноманітні схемні, конструктивні і програмні рішення в залежності від поставленого завдання. Тому розглянемо логічну структурну схему з метою засвоєння основного принципу визначення надійності механічних та електротехнічних систем і об'єктів. Структурна надійність це сумарна надійність пристрою при заданому його складі та відомих значеннях надійності усіх його частин, вузлів та елементів. Для розрахунку надійності електричного об'єкту складеється його логічна розрахункова модель. Вона, у свою чергу, має дві складових частини:

Перша частина це логічна схема у вигляді графу станів, які визначають стан надійності об'єкту (працездатний або непрацездатний) в залежності від стану окремих елементів;

Друга частина складається з математичної моделі в поєднанні з мікропроцесорними та програмними засобами апарат для опису функціонування цієї системи в цілому.

Існують три засоби з'єднання елементів на логічній схемі.

Послідовне з'єднання, використовується за умовою, що відмова одного елементу веде до відмови всієї схеми при умові, що відмова одного елементу не змінює надійності інших. Для цього випадку виконується наступна умова:

$$P(t) = P_1(t) * P_2(t) * \dots * P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) \quad (1.16)$$

В якості прикладу розглянемо побудову логічного розрахунку і моделей при послідовному з'єднанні елементів складних електромеханічних систем структурні схеми яких приведені на рис. 1.2.

При цьому скористаємось експоненціальним закону розподілу.

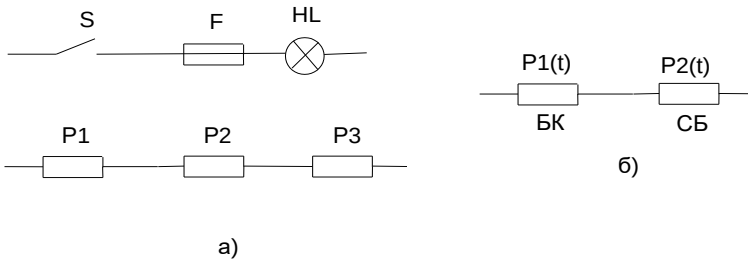


Рисунок 1.2 – Моделі розрахунків при послідовному з'єднанні елементів складних електромеханічних систем

Оскільки відмова будь-якого елементу схеми веде до відмови всієї схеми, то її ймовірність безвідмовної праці буде як добуток ймовірностей безвідмовної праці окремих елементів відповідно до наступних рівнянь:

$$P_i(t) = \exp(-\lambda_i * t), \quad (1.17)$$

$$P(t) = \prod_{i=1}^3 \exp(-\lambda_i * t) = \exp(-\lambda * t), \quad (1.18)$$

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = \sum_{i=1}^3 \lambda_i. \quad (1.19)$$

Якщо окремі елементи схеми мають різні закони розподілу, наприклад тиристорний регулятор напруги, структурна схема якого складається з двох блоків (див. рис.2.б), блоку керування (БК), який має експоненціальний закон розподілу, та силового блоку (СБ), який має нормальний закон розподілу, то отримуємо

$$P_1(t) = \exp(-\lambda_1 * t), \quad (1.20)$$

Заходимо послідовуючі показники надійності складних об'єктів.

$$P_2(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{c}\right)^\beta\right], \quad (1.21)$$

$$P(t) = \exp(-\lambda_1 * t) * \exp\left[-\left(\frac{t}{c}\right)^\beta\right], \quad (1.22)$$

$$-\ln P(t) = \left[\lambda_1 * t + \left(\frac{t}{c}\right)^\beta\right], \quad (1.23)$$

Паралельне з'єднання, використовується у випадку, коли система зберігає працездатність, якщо працездатен хоча б один елемент при умові незалежності праці елементів.

В якості прикладу розглянемо індикаторні лампи інформаційної панелі. Логічна розрахункова модель виглядає так, як показано на рис. 1.3.а).

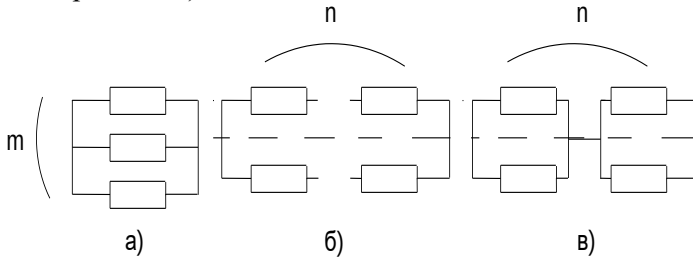


Рисунок 3 – Розрахункові моделі при паралельному з'єднанні елементів складних електромеханічних систем

В якості визначального показника в цьому випадку використовується ймовірність відмови.

$$Q(t) = \prod_{i=1}^m Q_i(t) = \prod_{i=1}^m [1 - P_i(t)], \quad (1.24)$$

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \prod_{i=1}^m [1 - P_i(t)]. \quad (1.25)$$

У випадку елементів з однаковими показниками надійності доцільно скористатись наступним рівнянням:

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - [1 - P_i(t)]^m \quad (1.26)$$

Комбіноване поєднання елементів має два принципових різновиди, які показані на рис. 23.б) і 23.в), де n - кількість послідовно з'єднаних елементів; m - кількість паралельно з'єднаних елементів. У випадку рівно надійних елементів відповідно маємо:

Для рис 1.2 б)

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - [1 - P_i(t)^n]^m, \quad (1.27)$$

Для рис 1.2 в)

$$P(t) = 1 - Q(t) = [1 - [1 - P_i(t)]^n]^m. \quad (1.28)$$

У випадку більш складних схем згортання здійснюється за аналогією з електричними схемами.

Доцільно відзначити, що паралельне з'єднання елементів електромеханічної системи та складних технічних об'єктів забезпечує підвищення надійності системи в цілому і використовується переважно для умов резервування.

1.6 Приклади побудови Логічних схем розрахунку надійності

В якості прикладу розрахунки визначальних показників надійності доцільно розглянути на простих електричних об'єктах.

Приклад 1.6.1. Побудувати логічну розрахункову схему трансформатора струму типу ТПОЛ для живлення релейного захисту, якщо дві вторинні обмотки підключені паралельно і струм спрацьовування реле менший, ніж струм однієї обмотки. Електрична і отримана логічна розрахункова схеми показані на рис. 1.4.

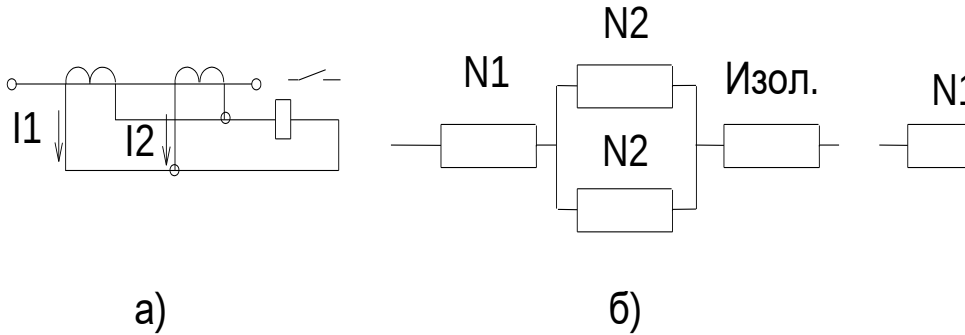


Рисунок 1.4 – Логічні розрахункові схеми трансформатора струму

На рис. 1.4 прийнято наступні позначення:

- а) електрична схема підключення;
- б) внутрішні короткі замикання відсутні;
- в) враховуються всі види відмов.

Приклад 1.6.2. Розробити логічну схему індикації освітлювальної мережі, схема якої показана на рисунку 2.5.а) за такими умовами:

- умова 1. Схема працездатна, якщо працездатен хоча б один світильник (2 індикатора). Коротке замикання у вимикачах не враховувати (рис.1.5.б);
- умова 2. Схема відмовляє, якщо непрацездатен хоча б один світильник (дві лампи відмовили) (рис. 1.5.в);
- умова 3. Схема відмовляє при непрацездатності 50 % світильників (відмова світильника при відмові хоча б одної лампи) (рис.1.5.г).

У даному випадку неможливо побудувати логічну схему у вигляді комбінації послідовного і паралельного підключення елементів. Цю задачу можливо вирішити за допомогою теорії графів.

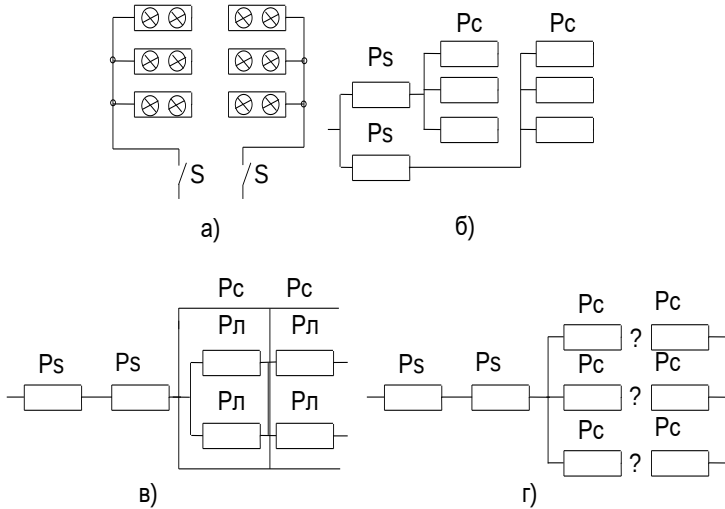


Рисунок 1.5 – Логічні розрахункові схеми системи освітлення

На рис.1.5 прийнято наступні позначення: а) електрична схема підключення; б) умова 1; в) умова 2; г) умова 3.

Приклад 1.6.3. Логічна розрахункова схема електромеханічної системи складається з п'яти послідовно з'єднаних елементів. Значення інтенсивності відмов складають: $\lambda_1 = 2 \cdot 10^{-5}$ 1/год; $\lambda_2 = 3 \cdot 10^{-5}$ 1/год; $\lambda_3 = 15 \cdot 10^{-6}$ 1/год; $\lambda_4 = \lambda_5 = 10^{-4}$ 1/год. Визначити сумарну ймовірність безвідмовної праці за витком 100 годин праці. Рішення. Для послідовно з'єднаних елементів маємо

$$P(100) = \exp(-\lambda \cdot 100) = \exp(-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5)), \quad (1.29)$$

$$P(100) = \exp(-(20 + 30 + 15 + 100 + 100) 10^{-6} \cdot 100) = 0,96.$$

Приклад 1.6.4. Логічна схема має три рівно надійних послідовно з'єднаних елементи. Структурна надійність схеми складає 0,98, час праці 2000 годин. Визначити значення інтенсивності відмов для одного елемента.

Рішення. Для елементів з однаковою надійністю необхідно додержуватись наступної умови:

$$P(2000) = P_{\text{елем}}^3(2000)$$

В умовах експоненціального закону для рівно надійних елементів, якщо виконується умова $\lambda t < 0,1$ або $P(t) > 0,95$, можливо рахувати як показано далі

$$P(2000) \cong 1 - \lambda t = 1 - 3\lambda_{\text{елем}},$$

$$\lambda = \frac{1 - P(2000)}{2000} = 10^{-5} \text{ 1/год.}$$

Перевіряються умови спрощеного розрахунку

$$\lambda t = 10^{-5} * 2 * 10^3 = 0,02 < 0,1$$

Визначається інтенсивність відмов одного елемента

$$\lambda_e = \frac{\lambda_e}{3} = \frac{10^{-5}}{3} = 3,3 * 10^{-6} \text{ 1/год}$$

Приклад 1.6.5. Розрахувати у загальному вигляді структурну надійність об'єкту, який складається з семи елементів різних показників надійності за схемою рис. 1.6.

Рішення. Для розрахунку структурної надійності необхідно згорнути реальну електричну схему за існуючими правилами. Згортаються елементи 1 – 2 та 3 – 4.

$$P_{1-2} = P_1 * P_2,$$

$$P_{3-4} = P_3 * P_4.$$

$$Q_{1-2} = 1 - P_1 * P_2, \quad Q_{3-4} = 1 - P_3 * P_4,$$

$$Q_{1-4} = Q_{1-2} * Q_{3-4} = (1 - P_1 * P_2)(1 - P_3 * P_4),$$

$$P_{1-4} = 1 - Q_{1-4} = 1 - (1 - P_1 * P_2)(1 - P_3 * P_4).$$

Згортаються всі послідовно з'єднані елементи

$$P_{5-7} = P_5 * P_6 * P_7,$$

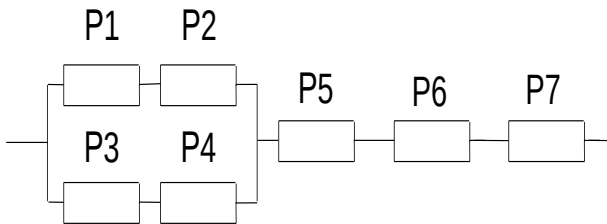


Рисунок 1.6 – Логічна розрахункова схема до прикладу 2.6.5

1.7 Резервування

Резервування це метод підвищення надійності шляхом введення надлишкового запасу технічних засобів. Розрізняють два засоби резервування: активне та пасивне.

Активне резервування має склад об'єкту такий, що при появі відмови він перебудовується і об'єкт відновлює власну працездатність.

Головною особливістю активного резервування є використання спеціальних перемикачів. В залежності від умов праці активного резерву розрізняють:

- навантажений резерв, коли резервні елементи мають той же режим, що і основний елемент, наприклад, силові трансформатори у двотрансформаторній підстанції, перетворювач у модульному виконанні та ін.;

- полегшений резерв, коли резервні елементи працюють у менш навантаженому режимі, ніж основні, наприклад, електронні лампи, праця яких забезпечується при заданому тепловому режимі;

- не навантажений резерв, коли резервні елементи не несуть навантаження.

Головний недолік активного резервування це порушення праці системи у момент перебудови її складу. Пасивне резервування має склад об'єкту такий, що при появі відмови перебудови структури не трапляється, елементи з'єднані постійно і відмова одного не оказує впливу на працю об'єкту.

При пасивному резервуванні внаслідок того, що елемент, що відмовив не вимикається, необхідно враховувати умови праці елементів після відмови. Згідно цієї ознаки розрізняють такі види пасивного резервування:

- з незмінним навантаженням, при якому внаслідок відмови навантаження на працездатні елементи не змінюється, наприклад, система освітлення при паралельному вмиканні ламп;

- з перерозподілом навантаження, коли навантаження елементу, що відмовив розподіляється між працездатними елементами, які мають навантаження менш номінального.

В залежності від виду резервних схем розрізняють дві системи резервування. Перший вид це схеми із загальним резервуванням, у яких резервується тільки головний робочий орган, який дає основну

кількість відмов. Наприклад, контактна система реле резервується, а допоміжні елементи (виводи, котушка, керування та ін.) не резервуються, як показано на рис. 1.7.а).

Другий вид це схеми з автономним резервуванням, у яких резервується всі елементи схеми, наприклад, підстанція з двома трансформаторами, як показано на рис. 1.7 б).

Головним показником резервованої системи є кратність резервування – це відношення кількості резервних елементів до кількості елементів що резервуються. Розрізняють однократне та багатократне резервування.

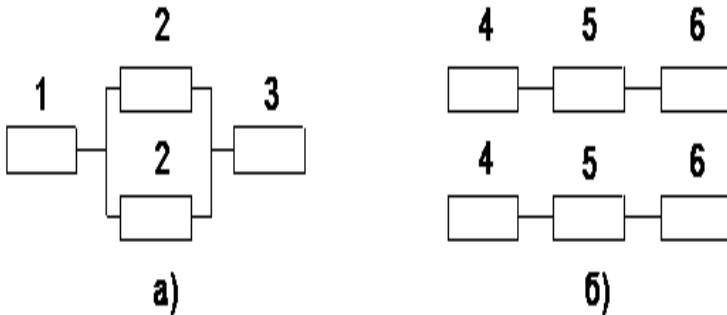


Рисунок 1.7 – Системи резервування

На рис.1.7 прийнято наступні позначення:

- а) загальне резервування;
- б) автономне резервування;
- 1 – котушка;
- 2 – контакти;
- 3 – виводи;
- 4 – двигун;
- 5 – трансформатор;
- 6 – тиристорний перетворювач.

1. 8 Оптимізація показників надійності електромеханічних систем

Розрахунок надійності виконується тоді, коли випробування неможливі або не раціональні (початковий етап проектування, оптимізація та ін.). Головне завдання розрахунку полягає в визначенні надійності системи на підставі ознак надійності її окремих елементів та заданою структурою і зв'язками між ними.

Такі розрахунки виконуються з наступною метою:

- аналізу можливості досягнення певного показника надійності в залежності від технології виробництва, елементної бази, методики випробування, умов експлуатації та ін.;

- знаходження розподілу показників надійності по окремим елементам, блокам, вузлам, комплектуючим та ін.;

- вибору того чи іншого конструктивного рішення з оптимальними технічними показниками відповідно до умов експлуатації;

- доцільності та умов резервування.

В якості початкових даних для розрахунку можуть використовуватись:

- електрична схема та функціональні зв'язки між елементами і вузлами;-

- режими роботи та параметри окремих елементів схеми;

- показники надійності окремих елементів при їх удосконаленні;

- види відмов та закони розподілу.

Для переважної більшості об'єктів характерними відмовами є обрив електричних ланцюгів, короткі замикання: окремих витків, обмоток, контурів заземлення і пресуючих вузлів, втрата електродинамічної стійкості та ін.

Для проведення розрахунку складається відповідна математична модель, яка відповідає реальному функціонуванню електромеханічної системи. Вона складається з двох частин: перша представляє собою логічну розрахункову схему, що відображає послідовно-паралельне з'єднання окремих елементів або відповідних граф переходів з одного стану в інший; друга складається з відповідного математичного представлення – аналітичних залежностей, формул, коефіцієнтів, параметрів навантаження в

статичних і динамічних станах, впливу зовнішніх факторів для вибраного закону розподілу надійності.

У розрахунках приймається умова, що напрацювання до відмови є незалежні випадкові величини (вторинні відмови не враховуються). На практиці використовуються наступні види розрахунків:

Попередній розрахунок використовується на стадії передпроектної проробки з метою визначення конструкції відповідно до технічних вимог і технічного завдання. Він дозволяє вирішити принципові питання роботи в поєднанні з певними комплектуючими і виконавчими механізмами.

В окремих випадках використовуються аналоги об'єкта, що розробляється. Кількість елементів визначається на підставі схеми аналога. Алгоритм розрахунку такий

$$\lambda_{oi} - \lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_{oi} = P(t) \quad (1.30)$$

Головне призначення цього розрахунку - перевірка можливостей виконання вимог по надійності згідно технічного завдання та порівняння різних варіантів виконання системи. Розрахунок здійснюється для різних умов, наприклад, $\lambda_{\min}$ та $\lambda_{\max}$.

Розрахунок оптимізації і узгодженості конструктивних елементів здійснюється після розробки принципових електричних схем об'єкту. Його головною метою є визначення узгодженості режимів елементів з метою забезпечення номінальних електричних і механічних навантажень в статичних і динамічних режимах і надійність.

Алгоритм розрахунку такий

$$\lambda_{oi} - \lambda_i = k_e * \lambda_{oi} - \lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i = P(t) \quad (1.31)$$

де λ_{oi} – табличні значення інтенсивності відмов елементів;

k_e – коефіцієнт, який враховує вплив експлуатаційних чинників (вологість, вібрація, температура оточуючого середовища).

Розрахунок остаточного конструктивного рішення дозволяє визначити режими навантаження та умови експлуатації як об'єкта в цілому, так і окремих вузлів і елементів. Він виконується на етапі конструктивного креслення, але передбачає можливі зміни, що до оптимізації та вдосконалення, або енергозберігання, режимів та ін. Наприклад, збільшення потужності регулюючого пристрою, класу експлуатації, умов експлуатації та ін.

Алгоритм розрахунку наступний:

$$\lambda_{oi} - \lambda_i = \kappa_{en} * \lambda_{oi} - \lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i = P(t), \quad (1.32)$$

$$\kappa_{en} = \kappa_e * \kappa_p * \kappa_i, \quad (1.34)$$

$$\kappa_p = f(\Theta, \kappa_n). \quad (1.35)$$

Коефіцієнтний розрахунок використовується у випадку, коли існує певне конструктивне рішення яке використовується в якості базового елементу схеми λ_6 . Алгоритм розрахунку наступний:

$$\lambda_6 - \lambda_i = \lambda_6 * \kappa_i - \lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i = P(t), \quad (1.36)$$

$$\kappa_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_6}, \quad (1.37)$$

де κ_i – емпіричні коефіцієнти для кожного типу елементів схеми, які враховують існуючі співвідношення між інтенсивностями відмов відповідних елементів. При проведенні розрахунку використовують значення $\kappa_{i\min}$ та $\kappa_{i\max}$.

Наприклад, для експоненціального закону розподілу отримуємо наступну аналітичну залежність:

$$P(t) = \exp(-\lambda t), \quad (1.38)$$

$$\lambda = \sum_{i=1}^n (\lambda_{\text{с}} * \kappa_i * m_i), \quad (1.39)$$

де n - кількість груп однотипних елементів;

m – кількість елементів у кожній групі.

Розрахунок надійності нерезервованої системи складається з наступних технічних і розрахункових етапів.

Складання логічної розрахункової моделі, яке вміщує вирішення таких задач: - аналізу функціонування системи в поєднанні з оцінкою можливості виникаючих відмов та здійснюється їх класифікація; визначається термін працездатного та непрацездатного стану кожного комплектуючого елементу та їх взаємний вплив в статичних і динамічних навантаженнях з урахуванням об'єкта в цілому; складається логічна модель, яка описує відповідні процеси об'єкта та окремих комплектуючих вузлів при умовах реальної експлуатації (послідовно-паралельна або у вигляді графа станів).

Корегування початкових похідних технічних даних: - λ_{oi} , кількість елементів кожної групи, емпіричні коефіцієнти κ , закон розподілу, параметри навантаження елементів, розрахункові формули та ін.

На підставі приведених вище розрахунків і підтвердження експериментальними дослідженнями виконується остаточний інженерний електромагнітний розрахунок, необхідних коефіцієнтів та параметрів і, на їх підставі, а обирається оптимальне рішення практичного завдання.

1.9 Розрахунок надійності резервованих систем

Більшість конструкцій електромеханічних систем можливо віднести до систем, що не відновлюються. Вони працюють за такою схемою: робота до відмови після зміни окремого вузла, що відмовив на новий, попередній ремонтується, або утилізують.

У більшості випадків електромеханічні об'єкти або системи мають складні функціональні зв'язки, що суттєво ускладнює

розрахунки надійності та складання логічної схеми з послідовно-паралельно з'єднаних елементів та ін. У цих випадках розрахунок здійснюється за допомогою теорії графів з використанням методу диференціальних рівнянь. При таких умовах розрахунки слід виконувати у наступній послідовності:

- Складання логічної розрахункової моделі у вигляді графу станів системи в цілому, у яких вона може знаходитись при відмовах окремих елементів у різні моменти часу експлуатації.

- Логічна розрахункова модель складається у вигляді графа станів.

- Прямокутниками зображуються можливі стани системи при відмові окремих елементів.

- Вектором між прямокутниками зображується напрямок переходу з одного стану в другий.

- Біля вектору позначається інтенсивність відповідного переходу.

Найбільш складним моментом цього етапу є визначення коефіцієнтів, які враховують змінення інтенсивності відмов при перерозподілі навантаження, яке виникає внаслідок відмови.

Приклад 1.9.1. Побудувати логічну розрахункову модель для схеми тиристорного модулю гібридного вимикача, що приведена на рис.27.а) при таких умовах: закон розподілу експоненціальний; один з трьох тиристорів резервний; інтенсивність відмов тиристора λ ; типи відмов тиристорів - пробій та обрив.

Рішення:

- Визначаються можливі стани** тиристорного модулю при виникненні відмов (рис.1.8.б), на основі яких будується логічна розрахункова модель (рис. 1.8.в). У загальному випадку його чисельне значення слід вибирати в межах 0,25; K_2 – коефіцієнт, який враховує збільшення інтенсивності відмов внаслідок перерозподілу навантаження по напрузі.

- Складається системи диференціальних рівнянь** яка полягає в наступному. Враховуємо взаємний зв'язок електромагнітних та електромеханічних процесів об'єкта в цілому або його фізичної моделі. У лівій частині кожного рівняння записується похідна за часом від ймовірності знаходження електромеханічної системи у даному стані.

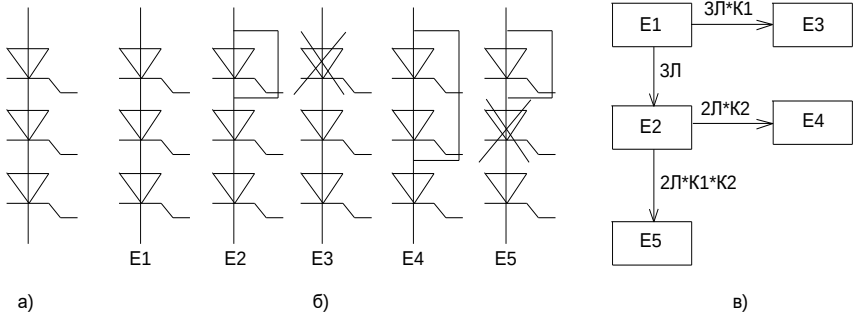


Рисунок 1.8 – Структурні схеми побудови логічної моделі тиристорного модулю для прикладу, що приведено в розділі 1

На рис. 1.8 прийнято наступні позначення: $K1$ – коефіцієнт, який враховує співвідношення ймовірності виникнення відмов типу пробій та обрив.

-У правій частині записується алгебраїчна сума добутків інтенсивностей та очікуваних переходів на відповідні ймовірні стани. Члени, які визначають перехід показника з одного в інший, мають знак «плюс», а переміщення з даного стану в інші мають знак «мінус». Останнє рівняння характеризує суму всіх відмовних станів об'єкта в цілому.

-Математична модель доповнюється перевірочним рівнянням

$$\sum_{i=1}^n P_i(t) = 1, \quad (1.40)$$

де $P_i(t)$ – ймовірність знаходження в i – ому стані згідно системи рівнянь (математичної моделі).

Приклад 1.9.2. Для логічної розрахункової моделі рис.27.в побудувати систему диференційних рівнянь

$$P_1^1(t) = -(3\lambda * K1 + 3\lambda)P_1(t),$$

$$P_2^1(t) = 3\lambda * P_1(t) - [2\lambda * K2 + 2\lambda * K1 * K2]P_2(t),$$

$$P_3^1(t) = 3\lambda * K1 * P_1(t) + 2\lambda * K2 * P_2(t) + 2\lambda * K1 * K2 * P_2(t).$$

Визначати необхідні коефіцієнти, параметри, рішення системи та показники надійності. Для рішення системи рівнянь необхідно мати наступні данні:

- чисельні значення коефіцієнтів, які враховують змінення інтенсивності відмов при перерозподілі навантаження, що, в свою чергу, призводить до відповідних відмов та формування послідовних наслідків;

- визначити закон розподілу напрацювання до відмови та його параметри;

- обрати відповідні значення інтенсивностей відмов при переходів з одного стану в інший та ін. параметри.

Такі розрахунки доцільно здійснити за допомогою ПК з використанням відповідного мікропроцесорного і програмного забезпечення [15]. Результуюча ймовірність безвідмовної роботи електромеханічної системи визначається на підставі наступного рівняння:

$$P(t) = \sum_{i=1}^m P_i(t), \quad (1.41)$$

де m – кількість рівнянь системи крім відмовних, які поєднані в останньому рівнянні системи.

Слід відзначити, що при виконанні таких розрахунків і досліджень необхідно ретельно додержуватись фізичного тлумачення та взаємних зв'язків між електричними, електромагнітними та електромеханічними параметрами об'єкта, що досліджується, або вводиться в експлуатацію.

1.10 Статистична оцінка результатів випробувань на надійність

Основна мета випробувань це отримання об'єктивної інформації про надійність з урахуванням сумісного впливу всіх експлуатаційних чинників. Головними недоліками випробувань є великі втрати часу та коштів, необхідність тривалого контролю за станом об'єкту, а також умова, що висновки випробувань характеризують минулий стан електромеханічної системи.

В умовах сталого технологічного процесу виготовлення електротехнічного об'єкту достатньо випробувати невелику кількість, яку називають вибірковою. Це дозволяє частково зменшити недоліки випробувань. Випробування на надійність можливо класифікувати таким чином: визначальні випробування, які здійснюються для знаходження кількісних показників надійності; контрольні випробування, які здійснюються для того, щоб визначити об'єкт, що контролюється до певної групи придатних або не придатних за рівнем надійності з урахуванням ризиків постачальника та замовника; спеціальні випробування, які здійснюються для вивчення деяких явищ, пов'язаних з оцінкою надійності (довготривалість, вплив окремих факторів, результатів модернізації та ін.).

Засоби зниження тривалості і коштовності випробувань доцільно використовувати додержуючись наступної послідовності: прискорення випробувань за рахунок моделювання процесу виникнення відмов, наприклад, підвищення струму, напруги, температури, частоти комутацій та ін.

Приклад 2.10.1. При проведенні теплових випробувань об'єкту для скорочення їх тривалості у початковий момент часу струм навантаження складає $(2 - 3) I_{ном}$. По мірі зростання температури до припустимого значення, при відповідних струмах навантаження, вона поступово змінюється. Необхідно прогнозувати змінення визначального показника і відповідного параметру, що контролюється за невеликим обсягом випробувань.

Визначення кінцевого значення температури відбувається відповідно до послідовності проведення експерименту. При цьому

визначаються експериментальні данні на обмеженому відрізку часу випробувань.

На підставі даних експерименту будується графік розподілу функції і визначається теоретична функція закону розподілу. Наприклад експоненціальна, яка апроксимує реальну експериментальну функцію та її параметри, як показано на рис. 1.9. На підставі розрахунку визначають інші точки функції та будується графік, за яким знаходять необхідні параметри та коефіцієнти.

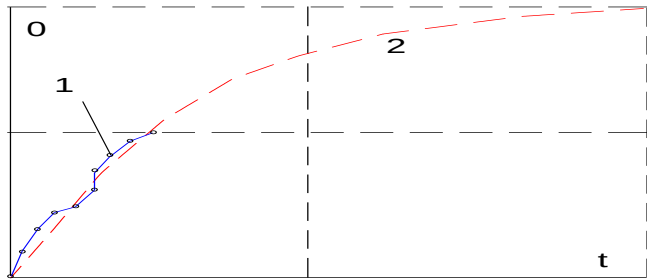


Рисунок 1.9 – Графічне прогнозування розвитку теплового процесу по експериментальним даним (1) та апроксимуюча функція (2)

Як видно, для отримання достовірного значення певних функціональних залежностей необхідно провести досить велику кількість вимірювань з дотриманням метрологічних вимог.

1.11 Методи планування проведення випробувань

Випробування здійснюються з урахуванням системи правил, які в сукупності представляють план випробувань. При вирішенні практичних задач доцільно дотримуватись двох видів планів: плани з відновленням об'єктів, що відмовили, на нові (плани з відновленням) до яких відносяться NBT, NBr, NB(T, r) та ін; плани без відновлення об'єктів, що відмовили на нові (плани без

відновлення), до яких відносяться NRT , NRr , $NR(T, r)$, NRT_{Σ} , NRN та ін.,

де N – кількість електромеханічних систем, встановлених для випробувань у початковий момент часу;

B – плани, для яких кожна система при відмові миттєво змінюється на нову (випробування з відновленням);

R – плани, для яких система, що відмовила, вилучається з випробувань і не замінюється на нову (без відновлення);

T – випробування здійснюються за тривалістю часу T ;

R – випробування здійснюються до моменту виникнення r – ої відмови;

(T, r) – випробування здійснюються до виникнення однієї з цих умов;

T_{Σ} - випробування здійснюються до сумарного напрацювання.

Відповідно до електромеханічних систем доцільно використовувати план NRN . Згідно цього плану за висновками випробувань оцінюються наступні показники і параметри надійності:

-середнє значення напрацювання до відмови

$$T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i, \quad (1.42)$$

де t_i – напрацювання до відмови кожного об'єкту:

-середнє квадратичне відхилення часу напрацювання до відмови відносно середнього значення

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (t_i - T)^2}{N-1}}; \quad (1.43)$$

- середнє квадратичне відхилення середнього часу напрацювання до відмови (для вибірки) відносно його середнього значення

$$\sigma_T = \frac{\sigma_t}{\sqrt{N}}; \quad (1.44)$$

Де σ_t - довірений інтервал, який визначається з урахуванням закону розподілу та довіреної ймовірності;

N - об'єм вибірки для випробувань із заданою точністю та ймовірністю

$$N_b = \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_T} \right)^2. \quad (1.45)$$

До недоліків такого підходу відносяться (без відновлення) досить велика тривалість та кількість об'єктів. Використання відновлення дозволяє зменшити кількість одночасно встановлених об'єктів та час проведення випробувань а також зменшити взаємний вплив об'єктів з великим терміном напрацювання до відмови.

1.12 Емпіричні показники основних параметрів надійності

За результатами випробувань можливо визначити такі параметри.

Часова діаграма потоку відмов, яка показана на рис. 1.10 а) показує яким чином розподіляються результати вимірювання в певні часові інтервали.

Емпірична функція густини розподілу напрацювання до відмови, яка визначається у такій послідовності:

- вся часова вісь $(0 \dots T)$ поділяється на інтервали рівної довжини $(0, t_1), (t_1, t_2), (t_2, t_3), (t_3, t_4), \dots$;

- підраховується кількість напрацювань до відмови n_i , які входять до кожного інтервалу;

- визначаються середні для інтервалу значення функції густини розподілу для кожного інтервалу за умовою

$$f_i(t) = \frac{n_i}{N(t_i - t_{i-1})}, \quad (1.46)$$

де N – загальна кількість відмов

n_i – кількість відмов, які входять до i – ого інтервалу;

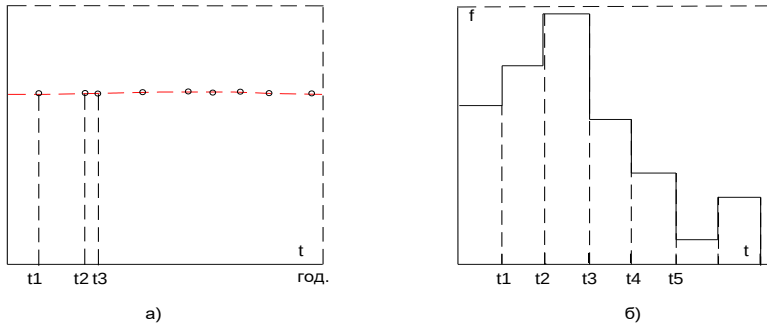


Рисунок 1.10 – Часова діаграма а) та функція густини розподілу б)

- будується графік функції густини (див. рис. 29.б) та визначаються інші параметри.

Емпірична функція розподілу напрацювання до відмови, яка показана на рис. 2.11а), визначається у такій же послідовності. Її значення розраховуються згідно умови

$$P(t) = 1 - \frac{n(t_i)}{N}, \quad (1.47)$$

$$Q(t) = \frac{n(t_i)}{N}, \quad (1.48)$$

де $n(t_i)$ – кількість значень напрацювань до відмови, які знаходяться у інтервалі $(0, t_i)$, це інтервали $(0, t_1)$, $(0, t_2)$, $(0, t_3)$,...

Емпірична функція інтенсивності відмов визначається у наступній послідовності:

-вся часова вісь $(0, T)$ поділяється на інтервали рівної тривалості;

-визначається кількість відмов n_i , які знаходяться у кожному інтервалі;

-для кожного інтервалу визначається середнє значення інтенсивності відмов за умовою

$$\lambda(t) = \frac{n_i}{N(t)(t_i - t_{i-1})}, \quad (1.49)$$

де $N(t)$ – кількість об'єктів, які знаходяться на випробуванні у момент часу t ;

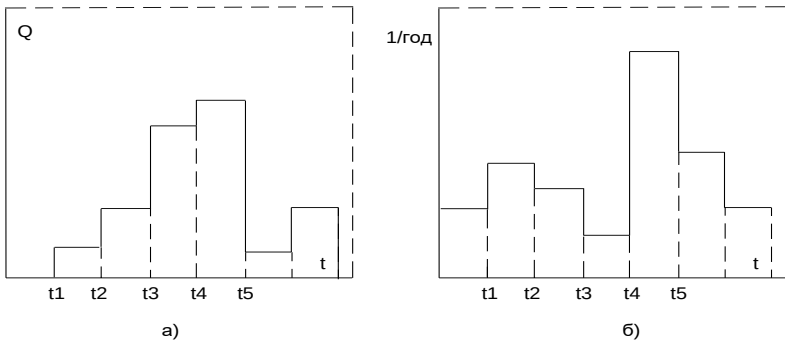


Рисунок 1.11 – Функція розподілу напрацювання до відмови а) та функція інтенсивності відмов б)

Графік функції (див. рис. 1.11.б) ілюструє логічну послідовність визначення необхідних параметрів і коефіцієнтів.

В таких випадках доцільно попередньо визначитись з можливими похибками. Для підвищення точності розрахунків інтервали доцільно зменшувати, а для отримання оціночних результатів дослідження інтервали можливо не значно збільшувати.

1.13 Узгодженість теоретичних і експериментальних законів розподілу

Перевірка відповідності вибраного теоретичного закону реальному розподілу напрацювання до відмови здійснюється на основі статистичних даних та за допомогою відповідних критеріїв. Обираються два підходи, які отримано експериментально і вибраного теоретичного закону розподілу, та альтернативні експериментальні данні, що не відповідають вибраному теоретичному закону розподілу. На підставі порівняльного аналізу ступеня узгодженості і оцінки похибок підтверджується або відхиляється можливість використання теоретичного розподілу при проектуванні електромеханічної системи. На практиці використовують декілька критеріїв. Найбільш широке використання отримали критерій χ^2 та критерій Колмогорова. Коротко розглянемо їх переваги і недоліки.

Критерій χ^2 . Використання цього критерію доцільно здійснювати в наступній послідовності:

- вся часова вісь $(0, T)$ поділяється на m інтервалів $(0, t_1), (t_1, t_2), (t_2, t_3), \dots, (t_{n-1}, t_n)$ за умовою, що $m > (6 \dots 8)$;
- визначається кількість напрацювань, які знаходяться у кожному інтервалі n_i ;
- розраховується теоретична ймовірність P_i попадання в i – тий інтервал для закону розподілу, що перевіряється за формулою

$$P_i = 1 - \frac{n(t_i)}{N}; \quad (1.50)$$

- визначається розрахункове значення критерію χ^2 за формулою

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(n_i - N \cdot P_i)^2}{N \cdot P_i}, \quad (1.51)$$

де m – кількість інтервалів, кількість яких повинно вибиратись не меншим, ніж (6...8);

N – кількість випробувань, яких повинно бути не менш, ніж (50...60);

-визначається табличне значення критерію $\chi^2_{\text{табл}}$ за довідковими джерелами [7,22]

$$\chi^2_{\text{табл}} = f(m - 1, \varepsilon), \quad (1.52)$$

де ε - рівень значення, який обирається зі стандартного набору 0,1; 0,05; 0,01; 0,001.

Фізичне тлумачення параметру ε полягає в оцінці ймовірності отримати помилку при порівнянні гіпотез, що розглядаються. Чим вище значення параметру ε , тим вище точність узгодженості.

Якщо гіпотеза вірна, тобто данні експерименту (випробувань) не суперечать гіпотезі, то виконується умова

$$\chi^2 \leq \chi^2_{\text{табл}} \quad (1.53)$$

Критерій Колмогорова використовується в наступній послідовності:

-вся часова вісь поділяється на m інтервалів $(0, T_1), (T_1, T_2), (T_2, T_3), \dots, (T_{n-1}, T_n)$ за умовою, що $m > (6...8)$;

-за отриманими значеннями напрацювань $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ розраховується емпірична функція розподілу напрацювання до відмови за умовою

$$Q_i(t) = \frac{n(t_i)}{N}, \quad (1.54)$$

де $n(t_i)$ – кількість відмов, які потрапили в i – тий інтервал $(0, t_i)$;

N – кількість відмов, які встановлені на випробування;
 - на координатних вісях відповідного закону розподілу, (що перевіряється), будуються розрахункові точки.

Ці точки апроксимуються прямою лінією таким чином, щоб відхилення розрахункових точок від прямої були мінімальними, як показано на рис.1.12;

-визначається максимальне відхилення модулю Q_m теоретичної функції розподілу, що перевіряється, від експериментального значення і перевіряється умова

$$Q_m * \sqrt{N} \leq 1 \quad (1.55)$$

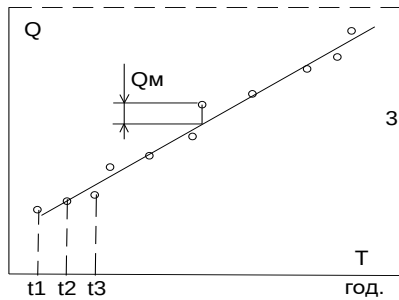


Рисунок 1.12 – Емпірична функція розподілу
 напрацювань до відмови

Якщо ця умова виконується, то для обраного рівня значення критерію можливо рахувати, що обраний теоретичний розподіл не суперечить експериментальним даним.

Приклад 1.13.1. Визначити середнє значення напрацювання до відмови T_{cp} , середнє квадратичне відхилення часу напрацювання до відмови σ_t та середнє квадратичне відхилення середнього часу напрацювання до відмови σ_T при довірєній ймовірності $P_{дов} = 0,96$ по такому статистичному ряду напрацювань до відмови згідно плану

NRN: 95, 118, 122, 135, 138,

142, 146, 152, 157, 161,

164, 175, 182, 198 годин.

Рішення:

Будується потік відмов. Для цього часова вісь поділяється на рівні інтервали і визначаються середні значення для кожного інтервалу, як показано на рис.1.13. Результати розрахунку на кожному етапі заносяться у табл. 1.13.

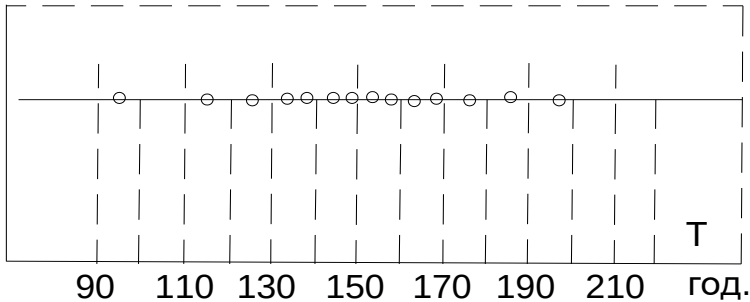


Рисунок 1.13 – Набір відмов до прикладу 1.13.1

Визначається вид закону розподілу часу напрацювання до відмови. Будується емпірична лінійна функція густини розподілу напрацювання до відмови, яка показана на рис.2.13. Середнє для кожного інтервалу значення функції визначається з умови

$$f_i(t) = \frac{n_i}{N \cdot (t_i - t_{i-1})}, \quad (1.56)$$

де n_i – кількість відмов в i -ому інтервалі;

N – загальна кількість відмов.

$$f_1(t) = \frac{1}{14(110-90)} = 0,0036,$$

$$f_2(t) = \frac{2}{14(130-110)} = 0,0071, \dots$$

Результати розрахунку заносяться у табл. 1.1.

За виглядом функції густини обирається функціональна залежність, що відповідає експериментальному розподілу апроксимованого нормальним законом розподілу.

Перевіряється гіпотеза по нормальному закону розподілу за допомогою критерію χ^2 .

Для цього для кожного з обраних інтервалів визначається ймовірність P_i визначення функції у i – тий інтервал закону розподілу, що перевіряється.

Всі розрахунки доцільно ретельно перевіряти з метою запобігання отримання хибної інформації

Таблиця 2.1 – Результати розрахунків

Номер інтервалу	1	2	3	4	5	6
Довжина інтервалу	100	120	140	160	180	200
Число відмов	1	2	4	4	2	1
Значення функції густини	,0036	,0071	,0143	,0143	,0071	,0036
$P_i(t)$	0,928	0,786	0,5	0,286	0,071	0

Значення ймовірності визначається з умови

$$P_i(t) = 1 - \frac{n(t_i)}{N}, \quad (1.57)$$

де $n(t_i)$ – кількість відмов, які влучили в інтервал $(0, t_i)$.

$$P_1(t) = 1 - \frac{1}{14} = 0,928,$$

$$P_2(t) = 1 - \frac{1+2}{14} = 0,786,$$

$$P_3(t) = 1 - \frac{1+2+4}{14} = 0,5, \dots$$

Результати розрахунку заносяться у таблицю.

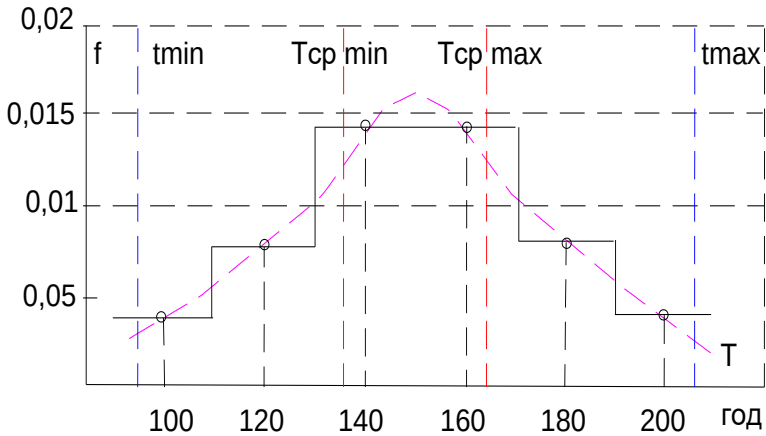


Рисунок 1.14 – Функція густини розподілу та її параметри

Визначається розрахункове значення критерію χ^2 з умови

$$\begin{aligned} \chi^2 &= \sum_{i=1}^6 \frac{(n_i - N * P_i)^2}{N * P_i} = \\ &= \frac{(1 - 14 * 0,928)^2}{14 * 0,928} + \frac{(2 - 14 * 0,786)^2}{14 * 0,786} + \frac{(4 - 14 * 0,5)^2}{14 * 0,5} \\ &\quad + \frac{(4 - 14 * 0,286)^2}{14 * 0,286} + \frac{(2 - 14 * 0,071)^2}{14 * 0,071} \\ &\quad + \frac{(1 - 14 * 0)^2}{14 * 0} \end{aligned}$$

$$= 11,07 + 7,36 + 1,29 + 0 + 1,018 = 20,75.$$

Визначається табличне значення критерію. Для цього спочатку знаходиться рівень значимості з умови

$$\varepsilon = 1 - P_{\text{дов}} = 1 - 0,96 = 0,04$$

Для подальшого розрахунку обираємо мінімальну точність і рівень значення 0,001. Тоді табличне значення критерію буде

$$\chi^2_{\text{табл}} = f(m - 1, \varepsilon) =$$

$$= f(6 - 1, 0,001) = 20,5$$

Перевіряється умова

$$\chi^2 \leq \chi^2_{\text{табл}}, \quad 20,75 < 20,5.$$

Так як умова майже виконується, то можливо вважати, що данні випробувань не суперечать теоретичному нормальний закону розподілу напрацювання до відмови. Для уточнення повторюємо перевірку гіпотези про нормальний вид закону розподілу за допомогою критерію Колмогорова.

По таблицям із справочних джерел визначається критичне значення емпіричного параметру A

$$A(N, \varepsilon) = A(14, 0,001) = 0,418.$$

Розраховується емпірична функція розподілу напрацювання до відмови

$$Q_i(t) = \frac{n(t_i)}{N},$$

$$Q(100) = \frac{1}{14} = 0,07,$$

$$Q(120) = \frac{3}{14} = 0,21,$$

$$Q(140) = \frac{7}{14} = 0,5,$$

$$Q(160) = \frac{11}{14} = 0,79,$$

$$Q(180) = \frac{13}{14} = 0,93.$$

На координатних осях нормального закону розподілу будуються отримані значення функції розподілу і проводиться пряма лінія таким чином, щоб максимальні відхилення координати Q_m були як можливо менш. Обирається максимальне відхилення Q_m і перевіряється умова $Q_m < A$, або більш грубо

$$Q_m * \sqrt{N} \leq 1,$$

$$Q_m = 0,09 < 0,418;$$

$$0,09 * \sqrt{14} = 0,3 < 1,0.$$

Всі умови, при виконенні яких гіпотеза рахується вірною, виконуються, тому можливо рахувати, що експериментальні данні не суперечать нормальному закону розподілу.

Визначається середнє напрацювання до відмови

$$T_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{14} t_i = 150 \text{ год.}$$

Визначається середнє квадратичне відхилення часу
напрацювання до відмови

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{\sum (t_i - T_{cp})^2}{N-1}} = \sqrt{\frac{(95-150)^2 + (118-150)^2 + (122-150)^2 + \dots}{14-1}} = 27 \text{ год.}$$

Визначається середнє квадратичне відхилення середнього часу
напрацювання до відмови

$$\sigma_T = \frac{\sigma_t}{\sqrt{N}} = \frac{27}{\sqrt{14}} = 7 \text{ год.}$$

Визначається інтервал для часу напрацювання до відмови при
довіреній ймовірності 0,96 при нормальному законі розподілу

$$t_{min} = T_{cp} - 2\sigma_t = 150 - 2 * 27 = 96 \text{ год,}$$

$$t_{max} = T_{cp} + 2\sigma_t = 150 + 2 * 27 = 204 \text{ год.}$$

Визначається довірений інтервал для середнього часу
напрацювання до відмови

$$T_{cp \text{ min}} = T_{cp} - 2\sigma_{T_{cp}} = 150 - 2 * 7 = 136 \text{ год,}$$

$$T_{\text{ср max}} = T_{\text{ср}} + 2\sigma_{T_{\text{ср}}} = 150 + 2 * 7 = 164 \text{ год.}$$

Результати розрахунку довірених інтервалів приводяться на відповідні таблиці або залежності.

1.14 Ефективність електромеханічних систем

Під ефективністю слід розуміти ступінь відповідності електромеханічної системи цільовому призначенню у відповідних умовах експлуатації. Критерій ефективності це деякий кількісний показник, який використовується для оцінки і зрівняння варіантів окремих конструктивних або схемних рішень. На практиці використовуються два види показників ефективності: для фіксованого стану і режиму функціонування об'єкта і для оцінки функціонування в межах певного інтервалу часу, технологічного процесу (інтервальної ефективності).

Показник ефективності визначається з урахуванням наступних умов:

- використання системи з метою досягнення певного технологічного процесу в межах директивного завдання потребує в якості визначального показника ефективності обирати ймовірність відповідного параметра, що забезпечує процес (потужність, температуру, струм та ін.);

- при використанні випадкового значення доцільно ефективність визначати відповідно до розподілу цієї випадкової величини, або її моменти (математичне очікування m_t або дисперсію σ_t^2).

Сумісне використання понять надійності та ефективності зручно використовувати у наступних випадках:

- для окремого технічного об'єкту, який можливо використовувати не залежно від інших, наприклад, комплектний розподільчий пристрій (КРП), комплектна трансформаторна підстанція (КТП) та ін. У цьому випадку можливо оцінювати як надійність, так і ефективність об'єкту;

- для окремих складових або комплектуючих об'єкту, що не можливо використовувати самостійно, наприклад, РПН, двигун в складі електропривода, ШІМ, окремий електротехнічний об'єкт, розподільчий пристрій. У таких випадках доцільно оцінювати надійність по показник ефективності об'єкту;

- для великої сукупності об'єктів, в якій відмови окремих об'єктів тільки погіршують властивості комплексу, доцільно використовувати поняття ефективності як для окремих комплектуючих, так і комплексу в цілому.

Визначальні критерії ефективності можуть бути ймовірнісними, інформаційними, коштовними, енергетичними, якості продукції, що виробляється та ін. Оцінку ефективності можливо здійснювати двома шляхами:

- За початковими або проміжними даними показників надійності в межах відповідних термінів експлуатації. В цьому випадку доцільно враховувати зміни ефективності внаслідок впливу певних чинників надійності.

При визначенні ефективності за першим шляхом доцільно додержуватись наступної послідовності:

- в якості початкового визначається ідеальне значення показника ефективності B_0 при умові абсолютно надійної роботи об'єкта в цілому;

- визначається поточне значення показника ефективності B з урахуванням фактичної надійності системи та певними частковими відмовами;

- оцінюється зниження ефективності внаслідок недостатньої надійності окремих вузлів або комплектуючих об'єкта за умовою

$$\Delta B = B_0 - B, \quad (1.58)$$

$$\frac{\Delta B}{B_0} = \frac{B_0 - B}{B_0}, \quad \frac{B}{B_0}. \quad (1.59)$$

Наприклад, для систем КРП, КТП показником ефективності зручно обирати кількість електроенергії (кВт*год.).

Величина реального значення показника ефективності B з урахуванням фактичної надійності системи визначається з умови

$$B = \sum_{i=1}^n B_i * P_i, \quad (1.60)$$

де n – кількість станів системи, в яких вона може знаходитись у процесі експлуатації;

B_i – умовний показник ефективності при умові, що система знаходиться у i -ому стані.

При визначенні ефективності другим шляхом визначаються показники надійності об'єкта з урахуванням зміни її ефективності у процесі функціонування. Відмовою вважається зниження параметрів навантаження нижче нормованих показників. В якості основних економічних показників ефективності використовуються:

- прибуток сировини, що виробляється за одиницю часу

$$\Pi = B - W_e, \quad (1.61)$$

де W_e – величина експлуатаційних витрат в одиницю часу;

B – величина вихідного ефекту, яка завдається прибутком в одиницю часу при експлуатації об'єкта, яка відображена у коштовних одиницях;

- термін при якому витрачені раніше кошти повертаються

$$t_{ок} = \frac{W_k}{B - W_e}, \quad (1.62)$$

де W_k – величина капітальних витрат.

- загальні витрати за термін T_c використання об'єкта

$$W = W_k + T_c(W_e + \Delta B), \quad (1.63)$$

де ΔB – змінення ефективності системи при переході з одного варіанту до іншого;

T_c – термін праці системи.

Приклад 1.14.1. Джерело живлення об'єкту складається з двох КТП, які мають по одній кабельній лінії. Прибуток, який отримується від експлуатації однієї лінії живлення на протязі 1000 годин складає 10 умовних одиниць коштовності. У разі відмови лінії він втрачається.

Визначити середню величину реального прибутку B_{cp} , втрати прибутку ΔB і середній процент $\left(\frac{\Delta B}{B} 100\%\right)$ втрати прибутку на протязі 1000 годин експлуатації.

Рішення:

Визначається середня величина втрати прибутку

$$\Delta B = B_0 - B_p,$$

де B_0 – величина ідеального прибутку при умові абсолютної надійності системи електропостачання;

B_p – величина реального прибутку з урахуванням можливих відмов.

Визначається величина ідеального прибутку

$$B_0 = N * d = 2 * 10 = 20 \text{ у.о.},$$

де N – кількість ліній живлення, що дорівнює 2;

d – прибуток від однієї лінії, що дорівнює 10 у.о.

Визначається величина реального прибутку

$$B_p = d \sum_{i=1}^M (N - n_k) P_k(t_i),$$

де M – кількість можливих станів системи живлення;
 n_k – кількість непрацездатних ліній у даному стані системи,
 прибуток від яких губиться;
 $P_k(t_i)$ – ймовірність появи k – ого стану системи у момент часу
 1000 годин.

Визначається кількість станів системи, як показано на рисунку 34.а. Стани 1, 2, 3 це працездатні стани, а стан 4 – відмова системи і при визначенні ефекту не враховується.

Визначаються ймовірності появи кожного стану на основі логічної розрахункової моделі, яка показана на рис.2.15б). На основі цієї моделі складається система диференціальних рівнянь, яка описує процес зміни станів системи електропостачання.

$$P_1^1(t) = -(\lambda_1 + \lambda_2)P_1(t),$$

$$P_2^1(t) = \lambda_1 P_1(t),$$

$$P_3^1(t) = \lambda_2 P_1(t).$$

Після рішення системи диференціальних рівнянь визначаються значення ймовірностей знаходження системи у відповідних станах

$$P_1(t) = 0,92,$$

$$P_2(t) = 0,03,$$

$$P_3(t) = 0,05.$$

$$B_p = 10\{(2 - 0)P_1(1000) + (2 - 1)P_2(1000) + (2 - 1)P_3(1000)\} = 10\{2 * 0,92 + 1 * 0,03 + 1 * 0,05\} = 19,2 \text{ y.o.}$$

$$\Delta B = 20 - 19,2 = 0,8 \text{ y.o.},$$

$$\frac{\Delta B}{B_0} 100 = \frac{0,8}{20} 100 = 4 \text{ \%}.$$

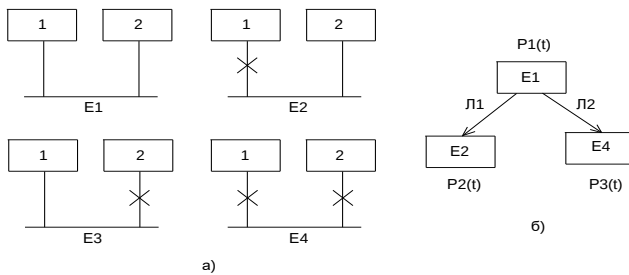


Рисунок 1.15 – Структурна схема побудови логічної розрахункової моделі

Приклад 2.14.2. Виконати порівняльний аналіз двох варіантів системи захисту та сигналізації, а також обрати найбільш ефективний згідно даних, які приведені в табл. 2.2 при умові, що термін роботи становить 10 років.

Рішення:

Визначається прибуток, який може мати система за рік

$$\Pi = B - W_e$$

Для першого варіанту $\Pi_1 = 48 - 16 = 32 \text{ т. грн.}$

Для другого варіанту $\Pi_2 = 56 - 24 = 32 \text{ т. грн..}$

Виявляється, що показники прибутку для обох варіантів однакові. Тому за таким показником не можливо обрати більш

ефективний варіант. Тому виконується оцінка варіантів згідно критерію повних витрат за термін використання об'єкту.

$$W = W_k + T_c[W_e + (B_0 - B)],$$

$$W_1 = 160 + 10[16 + (80 - 48)] = 640 \text{ т. грн.},$$

$$W_2 = 240 + 10[24 + (80 - 56)] = 720 \text{ т. грн.}$$

Оскільки $W_1 < W_2$, тому другий варіант вважається більш ефективним.

Оцінюються варіанти згідно терміну окупності за умовою

$$t_{ок} = \frac{W_k}{B - W_e},$$

$$\text{для першого варіанту } t_{ок1} = \frac{160}{48 - 16} = 5 \text{ г р},$$

$$\text{для другого варіанту } t_{ок2} = \frac{240}{56 - 24} = 7,5 \text{ гр.}$$

1.2 – Початкові дані для розрахунку ефективності електромеханічної системи

Поточні технічні показники, т.грн.		и	
Поточні витрати			
Експлуатаційні витрати за рік			
Показник вихідного ефекту за рік			
Ефективність впровадження за рік			

Оскільки $t_{ок1} < t_{ок2}$, тому перший варіант вважається більш ефективним.

1.15 Надійність технологічного процесу

виготовлення електромеханічних систем

Складовою частиною надійності конструкції електротехнічної системи є надійність виробничого процесу, який має ймовірнісний характер. Надійність виробничого процесу це здатність процесу забезпечувати виготовлення придатних виробів у повній відповідності з технічною документацією. Чисельно надійність виробничого процесу оцінюється умовою

$$P_{\text{вп}} = \frac{N_{\text{п}}}{N_{\text{о}}}, \quad (1.64)$$

де $N_{\text{п}}$, $N_{\text{о}}$ – відповідно кількість придатних виробів та загальна кількість виготовлених виробів.

Загальна кількість виробів визначається з умови

$$N_{\text{о}} = N_{\text{п}} + N_{\text{д}} + N_{\text{пд}} + N_{\text{дд}}, \quad (1.65)$$

де $N_{\text{д}}$ – кількість дефектних виробів, які визначені придатними через помилки у процесі вихідного контролю;

$N_{\text{пд}}$ – кількість придатних виробів, які визнані дефектними через помилки у процесі вихідного контролю;

$N_{\text{дд}}$ – кількість дефектних виробів.

Надійність виробничого процесу має три складові: надійність вхідного контролю $P_{\text{вх}}$; надійність технологічного процесу $P_{\text{тех}}$; надійність вихідного контролю $P_{\text{вих}}$.

Надійність кожної фази виробничого процесу являє собою ймовірність того, що продукція, що виробляється, буде придатною для використання. Якщо виходити з умови, що всі фази в ймовірнісному розумінні є незалежними, то їх можливо представити у вигляді складових

$$P_{\text{вп}} = P_{\text{вх}} + P_{\text{тех}} + P_{\text{вих}} \quad (1.66)$$

Для технологічного процесу, який складається з n операцій можливо вважати, що кожний із них виконує часткові операції відповідно до рівняння

$$P_{\text{тех}} = \prod_{i=1}^n P_i, \quad (1.67)$$

де P_i – надійність i – ої операції.

Часто для оцінки надійності технологічного процесу необхідно знати ймовірність появи дефектів. Як показує практика, поява дефектів описується ординарним пуассонівським потоком. Тоді поява на виході технологічного процесу «к» дефектних виробів визначається відповідно до рівняння

$$Q_{1...n}(k) = \left(\frac{m^k}{k!} \right) \exp(-m), \quad (1.68)$$

де n – загальна кількість операцій;

m – математичне очікування дефектів або середня кількість дефектів, що виникають у технологічному процесі;

k – кількість дефектних виробів, ймовірність появи яких розглядається.

Для сталого відпрацьованого технологічного процесу кількість дефектних виробів k звичайно дуже мала, наприклад, $k = 1$. Тоді ймовірність появи дефекту визначиться так

$$Q_{1...n}(1) = m \cdot \exp(-m). \quad (1.69)$$

Середнє значення дефектів m у технологічному процесі можливо визначити двома засобами:

- за допомогою статистичного контролю;
- за допомогою емпіричної формули
-

$$m = a * n^B, \quad (1.70)$$

де a коефіцієнт, що залежить від ритму виробництва;

n – параметр технологічного процесу, який визначається експериментально.

Наприклад, при складанні імпульсних вузлів елементів промислової електроніки значення коефіцієнтів складають

$$a = 0,033,$$

$$n = 1,887,$$

а після монтажу цих вузлів

$$a = 0,06425,$$

$$n = 1,986.$$

Ймовірність появи дефектних виробів при роботі одного оператора (монтажника, регулювальника і пр.) на одному робочому місці визначається так

$$Q_{\text{оп}} = \frac{m}{n}, \quad (1.71)$$

де n – кількість операцій, які виконує оператор;

m – середнє значення числа дефектів, яке допускає оператор на цьому робочому місці в технологічному процесі.

Тоді ймовірність виходу справних виробів на даному робочому місці визначиться з умови

$$P_{\text{тех.оп}} = 1 - Q_{\text{оп}} \quad (1.72)$$

Для усього технологічного процесу буде

$$P_{\text{тех}} = \prod_{i=1}^l (1 - Q_{\text{оп}}), \quad (1.73)$$

де l – кількість робочих місць у технологічному процесі.

За умовою рівно ймовірнісних значень надійності технологічних процесів на кожному робочому місці отримаємо

$$P_{\text{тех}} = (1 - Q_{\text{оп}})^l = \left(1 - \frac{m}{n}\right)^l \quad (1.74)$$

Таким чином, можливо встановити що при виготовленні окремих вузлів електротехнічних об'єктів та складних електромеханічних систем доцільно використовувати методологічні підходи які залежать від якості та технології їх виготовлення.

1.16 Діагностика електромеханічних систем

Сучасні електромеханічні системи та об'єкти представляють собою дуже насичені багато чисельними деталями та комплектуючими пристроями, які поєднані між собою і призначені для виконання відповідних функцій в умовах експлуатації в межах нормованих термінів декілька десятків років. На практиці, внаслідок порушення електротехнологічних режимів, забезпечити безперервну експлуатацію обладнання без відмов практично неможливо. Тому для забезпечення нормованих термінів експлуатації та підвищення надійності використовуються наступні технічні засоби:

- підвищення ймовірності безвідмовної роботи комплектуючих вузлів та визначальних елементів конструкції шляхом впровадження новітніх науково-технічних та енергозберігаючих розробок при використанні нових матеріалів, технологій, конструктивних рішень та ін.;

- впровадження прогресивних методів резервування шляхом зниження негативних рис, технологій збирання, зберігання та транспортування;

- зниження масо-габаритних показників при збереженні електромеханічних параметрів в статичних та динамічних режимах;

- технічна діагностика (ТД) об'єктів у процесі експлуатації. ТД це процес визначення технічного стану об'єкт на різних етапах його експлуатації.

Пристрої ТД можуть здійснювати такі функції:

- вхідний контроль комплектуючих елементів;
- контроль типових елементів заміни;
- контроль окремих силових блоків об'єкту.

Основні завдання, які може вирішувати система ТД:

- перевірка працездатності контролюємого об'єкту;
- визначення вірності функціонування окремих блоків і об'єкту в цілому;
- пошук і фіксація відмов.

Розрізняють два основних засоби ТД: функціональна технічна діагностика (ФТД) забезпечує контроль за поточним технічним станом об'єкту у процесі експлуатації та звіряння з еталоном; тестова технічна діагностика (ТТД) забезпечує прогнозування стану об'єкту при різних видах відмов та визначення методів, якими їх доцільно контролювати і виявити. До недоліків слід віднести досить велика кількість початкових і вхідних міроприємств та їх взаємних сполучень і впливів, неоднозначна визначеність різних технічних станів електротехнічних систем. Наприклад, обрив (не відкриття) тиристора може бути наслідком відмови самого тиристора або системи керування.

Зниження впливу негативних факторів можливо досягнути шляхом розробки і використання сучасних програмних та мікропроцесорних засобів автоматизації в поєднанні з автоматизованими системами керування ТД.

Ефективність системи ТД можливо визначити з умови

$$K_r = \frac{T_p}{(T_p + T_0 + T_B)}, \quad (1.75)$$

де K_r – коефіцієнт готовності;

T_r , T_0 , T_v – відповідно тривалість праці, обслуговування та відновлення.

Засоби ТД дозволяють скоротити проміжки часу T_0 та T_v .

Засоби діагностування складаються з подання на входи функціональних вузлів різних комбінацій сигналів, при яких значення на виході будуть різними для працездатних та непрацездатних станів. Наприклад, на вхід діоду подається напруга спочатку у прямому, а потім у зворотному напрямках, а на виході вимірюється величина його опору. Якщо опори різні (у прямому – малий, у зворотному – великий), то діод працездатний. Якщо опори великі, то діод має відмову типу обрив, якщо опори малі, то діод має відмову типу пробій.

Діагностична процедура складається з окремих частин. Кожна частина складається із сигналу, який подається на об'єкт зворотною реакцією і має назву елементарна перевірка або тест. Вибір типу діагностичної процедури визначається такими чинниками:

- глибиною пошуку дефектів, яка залежить від кількості давачів і складу тестових сигналів;
- організацією процесу діагностування (послементна, поблочна та ін.).

Всі процедури діагностування поділяються на два види:

- безумовні, за допомогою яких контролюється велика кількість станів, які не розрізняються, а оцінюються тільки по кінцевій інформації – працездатний або не працездатний стан.

Особливістю цих процедур є більш проста організація;

- умовні процедури дозволяють контролювати кожний технічний стан об'єкту.

Їх недоліком є складність організації з урахуванням раніше проведених перевірок та інших пошкоджень і відновлювання.

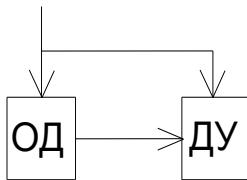
Таким чином, для проведення певних технічних дій і наукового дослідження доцільно визначитись з методом, який найбільше відповідає вирішенню поставленої мети та задовольняє можливій похибці, що може виникнути при дослідженні.

1.17 Класифікація алгоритмів та систем діагностування

У кожному конкретному випадку процедура діагностування полягає у визначенні послідовності виконання певних операцій, яка завдається у вигляді алгоритму. Розрізняють два види алгоритмів діагностування: це перевіряючі алгоритми і діагностуючі алгоритми. Вони відрізняються ступенем та глибиною пошуку дефектів та пошкоджень [11 - 15].

В залежності від засобу подання на об'єкт діагностування (ОД) перевіряючих дій розрізняють на системи функціонального діагностування (ФД) та система тестового діагностування (ТЕД). Принцип організації системи ФД показано на рис.1.16 а).

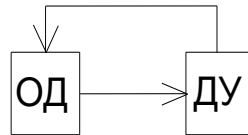
Зовнішня дія



Реакція

а)

Тест



Реакція

б)

Рисунок 1.16 – Структурна схема системи діагностування

На рис.1.16 прийнято наступні позначення:

- ОД – об'єкт діагностування;
- ДУ – діагностуючий пристрій.

В системі ФД в якості перевірочних зовнішніх дій можуть бути використані робочі сигнали від керуючих пристроїв ОД, наприклад, системи керування тиристорними перетворювачами. Але їх недоліком є те, що вони не можуть бути обрані свавільно. Систему ФД зручно використовувати у процесі експлуатації або для імітації

функціонування пристрою у процесі налагоджування та випробувань.

Головними чинниками системи ФД є такі:

- можливо отримати тимчасову інформацію про порушення у ОД;

- дозволяє змінювати у процесі функціонування вузли, що відмовили на резервні, а також переходити на інші режими роботи.

До недоліків системи ФД відносяться обмеженість кількості робочих (тестових) дій. Такі системи діагностування використовують у тиристорних перетворювачах для визначення відмови каналу, фази, блока в цілому.

У системі ТЕД, організація якої показана на рис.1.16б), перевірочні дії створюються безпосередньо діагностуючим пристроєм (ДУ). Перевагами системи ТЕД є такі:

- будь-який склад і послідовність подання тестових дій;
- для подання дій та отримання тестових реакцій можливо використовувати не тільки основні входи та виходи ОД, а також інші внутрішні вузли та кола;
- тестові перевірки можуть здійснюватися не тільки під час налагодження, але й у процесі експлуатації, наприклад, під час пауз або перерв у роботі.

Розрізняють два види тестових процедур діагностування, це перевіряючи та діагностуючі. У свою чергу перевіряючи тести поділяються на два типи:

- алгоритмічні тести, за допомогою яких перевіряють правильність функціонування об'єкту та його алгоритм. Вони використовуються для виявлення раптових сталих відмов, наприклад, у електричних колах перетворювачів пробій одного з вентилів при їх послідовному вмиканні. Перевірка здійснюється засобом програмного опитування задавачів струму та напруги у межах комутаційних інтервалів;

- параметричні тести, які дозволяють виконати такі перевірки:

- а)- відповідність реальних електричних режимів кола їх розрахунковим значенням (амплітуди імпульсів, часові співвідношення, затримки, інтервали, гармонічний склад та ін);

- б) відповідність параметрів елементів схеми паспортним даним.

- БЗ – блок зв'язку, він вмикає необхідні канали зв'язку згідно алгоритму, по яким реакції з ОД подаються на ДП;

- Структурна схема системи ТЕД показана на рис.1.18.

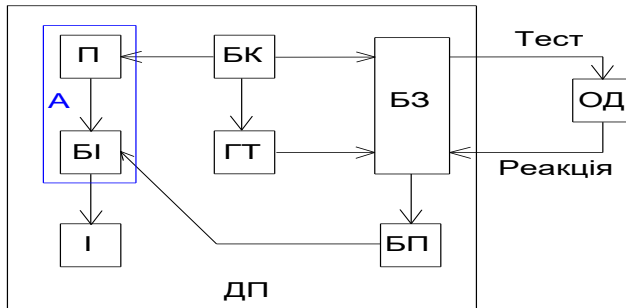


Рисунок 1.18 – Система тестового діагностування

На рис.1.18 використовуються такі позначення:

- ОД – об’єкт діагностування;
- ДП – діагностуючий пристрій;
- ГТ – генератор тестових дій, який працює згідно сигналів з БК.

Головні вимоги до структури ДП такі:

- не повинен знижувати надійність ОД, для чого повинен мати мінімальну кількість здавачів, вимірювальних пристроїв та ін.;
- повинен мати максимально високий рівень безпеки, ізоляцію дивачів від високої напруги;
- протяжність та кількість ліній зв'язку між ОД та ДП повинні бути мінімальні, надійність комутаційної апаратури, яка визначає загальну надійність, повинна бути на порядок вище надійності ОД;

- повинна забезпечуватися висока якість здавачів, які у більшості випадків не виготовляються промисловістю серійно.

У таких випадках необхідно дотримуватись чіткого розуміння протікання фізичного процесу та наслідків які можуть виникнути.

1.19 Методологічні основи діагностики

Головне завдання процедури діагностування це визначити належність стану об'єкта одному з кількох не пов'язаних[між собою можливих технічних станів, кількість яких визначається параметром – глибина діагнозу. Сутність цього параметру це кількість можливих станів ОД. Максимальна глибина діагнозу, наприклад, при контролі працездатності складає

$$M_{\min} = 2,$$

де M – кількість можливих станів ОД.

Максимальна глибина діагностування визначиться з умови

$$M_{\max} = M_{\text{п}} + M_{\text{н}}, \quad (1.76)$$

де $M_{\text{п}}$, $M_{\text{н}}$ – відповідно кількість всіх працездатних та непрацездатних станів ОД.

Діапазон діагнозу знаходиться у межах $2 \leq M \leq M_{\max}$. В системах без резервування, коли ймовірність появи другої відмови у проміжок часу між першою відмовою та діагностуванням дуже мала, глибина діагностування складає

$$M = n + 1, \quad (1.77)$$

де n – кількість елементів ОД, кожний з яких може знаходитися у двох станах, працездатному та непрацездатному.

Приклад 1.19.1. Визначити глибину діагностування для схеми рис.1.9.а), якщо елементи схеми ($n = 3$) можуть знаходитися у працездатному або у не працездатному станах.

Рішення.

$$M = n + 3 = 3 + 1 = 4$$

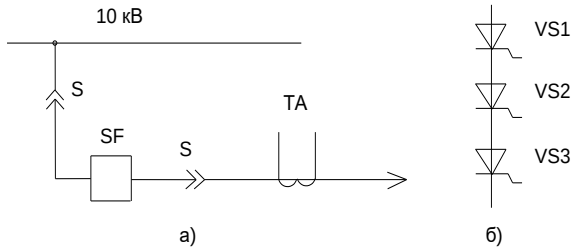


Рисунок 1.19 – Схеми електричні для прикладів

Коли ймовірність появи другої відмови у проміжок часу між першою відмовою та діагностуванням достатньо велика, то при двох непрацездатних станах кожного елемента схеми глибина діагностування визначиться з умови

$$M = \sum_{i=1}^n C_n^i = 2^n - 1, \quad (1.78)$$

де C – кількість сполук із n по i .

Приклад 2.19.2. Визначити глибину діагностування для схеми рис.2.19б), якщо елементи схеми ($n = 3$) можуть знаходитися у працездатному або у двох не працездатних станах (обрив або пробій тиристора).

Рішення.

$$M = 2^n - 1 = 2^3 - 1 = 8 - 1 = 7$$

Для m станів, які повинні бути визначені ПД максимальна глибина діагностування складе

$$M_{\text{мак}} = \sum_{i=1}^n C_n^i (m - 1) = m^n - 1 \quad (1.79)$$

Приклад 1.19.3 Визначити глибину діагностування для схеми рис. 2.20а), якщо у трансформатора напруги первинна та вторинна обмотки ($n = 2$) можуть мати відмови типу обрив, пробій та виткове замикання ($m = 3$).

Рішення.

$$M_{\text{мак}} = 3^2 - 1 = 9 - 1 = 8$$

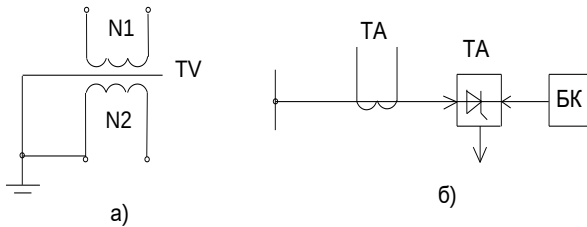


Рисунок 1.20 – Схеми електричні для прикладів

Повна кількість станів визначається з умови

$$M_{\Sigma} = \prod_{i=1}^b m_i^{n_i} = m^n, \quad (1.80)$$

де m_i – кількість станів елементів i – ой групи;

n_i – кількість елементів у цій групі;

b – кількість груп елементів з різною кількістю станів.

Приклад 1.19.4. Визначити глибину діагностування тиристорного регулятора напруги, структурна схема якого показана на рис.1.20б), при таких умовах:

ТА: $m_1 = 3$ (обрив, пробій, нормальний стан);

$$n_1 = 1;$$

БК: $m_2 = 2$ (працездатний, відмовний);

$$n_2 = 1;$$

БС: $m_3 = 2$ (працездатний, відмовний);

$$n_3 = 7.$$

Рішення.

1. Визначається глибина діагностування окремих вузлів та схеми в цілому

$$M_{ТА} = m_1^{n_1} = 3^1 = 3,$$

$$M_{БК} = 2^1 = 2,$$

$$M_{БС} = 2^7 = 128,$$

$$M = M_{ТА} * M_{БК} * M_{БС} = 3 * 2 * 128 = 762.$$

У реальних пристроях здійснюється мінімізація станів по аналогії графа переходів.

Алгоритм діагностування зображується у вигляді графа станів, на основі яких будується логічна розрахункова модель об'єкту.

Правила складання структурно-логічної моделі наступні:

- модель складається на основі принципової схеми пристрою;
- окремі елементи на схемі заміщуються відповідними дугами на логічній моделі;
- діоди і тиристори зображуються на структурно-логічній моделі орієнтованими дугами, що відображує вентильні властивості цих елементів;
- при відмові типу обрив відповідні дуги розриваються;
- при відмові типу пробій або замикання виникає об'єднання пари вершин у моделі;
- порушення ізоляції у реакторах, трансформаторах, а також інші види замикання на землю не призводять до зміни параметрів елементів електричного кола.

Таким чином, очевидно, що при визначенні надійності електромеханічних систем та складних об'єктів не можливо використовувати якийсь один метод. Необхідно чітко визначитись з

постановкою практичного завдання та об'єктом, що необхідно досліджувати в порівнянні з умовами експлуатації.

1.20 Спеціалізовані дослідження навантажень електромеханічних систем

Пристрій використовується для одночасного вимірювання та реєстрації сукупності параметрів навантаження, електромагнітних та електромеханічних поточних параметрів. Його доцільно і ефективно використовувати на стадіях проектування електротехнічного обладнання спеціального призначення параметри і характер навантаження яких перевищує вимоги нормативно-технічної документації, а також при приймально-здавальних випробуваннях. При цьому необхідною умовою є дотримання подоби електромагнітного поля, у моделі та оригіналі. Ідентичність електромагнітних процесів досягається шляхом дотримання визначальних критеріїв подоби.

Найбільш оптимальною умовою для електромагнітних досліджень є живлення струмом, що відповідає реальному навантаженню електромеханічної системи в умовах експлуатації. Структурна схема спеціалізованого стенда дослідження сукупності навантажень і електромагнітних процесів обладнання спеціального призначення показана на рис.1.21.

На рис.1.21 прийнято наступні позначення: 1- генератор змінного струму регульованої частоти 50-800Гц; 2- вимикач; 3 - моделюючий блок і формувач збуджуючого струму; 4 - регулятор навантаження; 5 - регулятор потужності; 6 - вимірник напруги; 7 - аналізатор спектра й частотних характеристик; 8 - безіндуктивний шунт; 9 - трансформатор струму з розширеним діапазоном частот; 10 - вимірник потужності й струму; 11 - випробувана модель; 12 - вимірник місцевих втрат; 13 - термопары; 14 - комплектуючий пристрій; 15 - короткозамикач

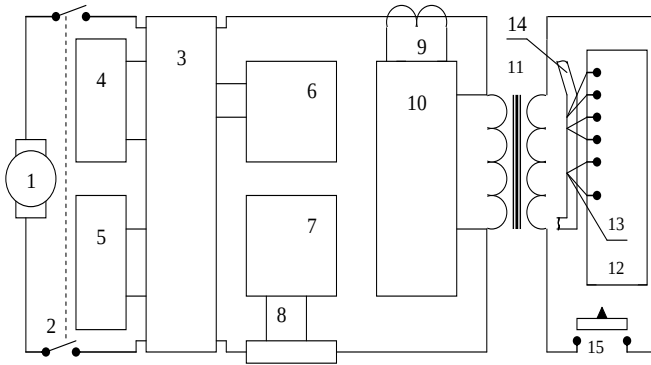


Рисунок 1.21 – Структурна схема спеціалізованого стенда для дослідження сукупності параметрів електротехнічного обладнання.

Питомі поверхневі втрати визначаються термометричним методом, поля розсіювання - індукційними датчиками, а інші фізичні величини - спеціальними пристроями й приладами. Режими навантаження можливо отримувати при синусоїдальному й несинусоїдальному струмах, відповідно:

$$I = I_m \sin(\omega t + \varphi), \quad (1.81)$$

$$I_{\Sigma} = I_0 + \sum_{v=1}^{v=N} I_v \sin(\omega_v t + \varphi_v). \quad (1.82)$$

Короткозамикач призначений для подачі поштовхом напруги на випробуваний об'єкт при вимірі питомих (поверхневих) втрат та перегріву деталей конструкції.

1.21 Спеціалізований пристрій аналізу і класифікації параметрів навантаження

Спеціалізовані пристрої ефективно використовувати при діагностиці електротехнічного обладнання. Він призначений для вимірювання, реєстрації, класифікації й систематизації навантаження по характерних ознаках, а також для встановлення закономірностей і взаємозв'язку електромагнітних і електромеханічних параметрів [7 -22].

Пристрій реєструє параметри, що перевищують номінальні й нормативно припустимі державними стандартами. Пристрій аналізує, реєструє та автоматизовано класифікує навантаження по наступним ознакам

$$\xi_{M1} = \sum_{i=1}^N \Pi_i(I_{\kappa 3}, I_{\epsilon}, I_n, I_m) \Big|_{\substack{k=1,2,\dots,n \\ \beta=A}}, \quad (1.83)$$

де Π - кількість перевищень струмів об'єкта;

I - струм;

k – кількість інтервалів по кратностям;

β - кількість досліджуваних фаз.

Реєстрація загальної кількості струмових впливів, і з більшою кількістю інтервалів класифікації по характерним ознакам відповідає наступному рівнянню:

$$\xi_{M1} = \sum_{i=1}^N \Pi_i(I_{\kappa 3}, I_{\epsilon}, I_n, I_m) \Big|_{\substack{k=1,2,\dots,n+p=\text{var} \\ \beta=A,B,c}}. \quad (1.84)$$

Передбачено можливість установлення й регулювання загальної границі по кратності аналізованих режимів при одночасній зміні, у заданому масштабі та окремих інтервалах.

Поряд із цим здійснюється класифікація аналізованих навантажень на струми коротких замикань, струми включення, поштовхи й кидки струмів, включаючи технологічні короткі замикання згідно наступному виразу::

$$\xi_{M3} = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^N \Pi_i(I_{K3}) \\ \sum_{j=1}^H \Pi_j(I_{\theta}) \\ \sum_{q=1}^M \Pi_q(I_n) \\ \sum_{\delta=1}^P \Pi_{\delta}(I_m) \end{array} \right\}, \quad (1.85)$$

$k=1,2,...n...n+p$
 $\beta=A,B,C$
 $\gamma=I_{K3}, I_{\theta}, I_n, I_m$

де k -кількість каналів по кратності;

β - фази навантаження;

γ - класифікація нестаціонарних струмів;

i - кількість струмів короткого замикання;

j - кількість струмів включення власні й зовнішніх;

q - поштовхи струмів;

δ - кидки струмів.

Отримана інформація зберігається в пам'яті спеціалізованого пристрою та може зніматися з монітора, передаватися для подальшого аналізу і накопичення інформації про перевантаження.

Структурна блок-схема спеціалізованого пристрою, функціональні зв'язки між блоками й технічними можливостями пояснюються на схемі, що наведена на рис. 1.22.

На рис. 1.22 прийнято наступні позначення:

1-вимірювальний трансформатор струму (використається при дослідженнях струмів, а при дослідженнях напруг варто використати трансформатор напруги) з розширеним діапазоном частот або шунт, або інший об'єкт знімання інформації;

2- перетворювач струму або піковий детектор;

3- блок масштабування аналізованих сигналів, що перевищують припустимі нормативно-технічною документацією; 4- аналого-порівняльний логічний блок;

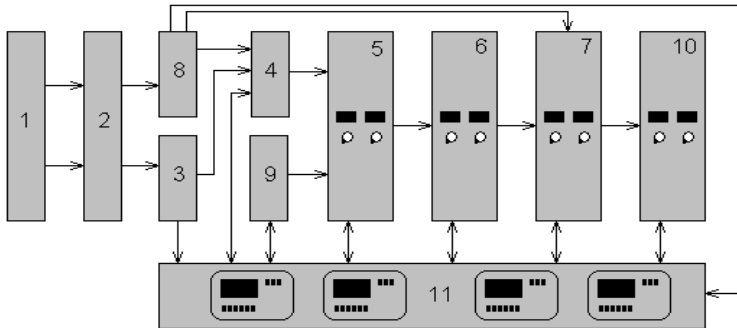


Рисунок. 1.22 – Структурна блок-схема спеціалізованого пристрою для вимірювання, реєстрації та класифікації навантаження електротехнічних об’єктів

5- програмно-аналітичний блок;

6 - блок класифікації по кратностям аналізованої інформації;

7- блок класифікації по продовжності різкозмінних впливів;

8- генератор тактових імпульсів;

9-бібліотека нормованих сигналів по кратностям, тривалості й кількості;

10- блок зберігання логічної інформації;

11- блок індикації й знімання кінцевої інформації, включаючи сигналізацію й можливі несправності в пристрої.

Робота пристрою пояснюється наступним: нестационарний різкозмінний навантажувальний струм, що протікає в системі збудження досліджуваного електротехнічного об’єкта і в первинній обмотці трансформатора струму 1. Ця інформація трансформується у вторинний струм. Потім формується первинний сигнал, що за формою й характером пропорційний навантажувальному струму електротехнічного обладнання. Цей сигнал подається на вхідні ланцюги блоку пікового детектора 2. У цьому блоці сигнал перетворюється в однополярні імпульси та одночасно запускається генератор тактових імпульсів 8 і одночасно надходить у вхідні

ланцюги блоку масштабування 3. Потім, аналізуємий сигнал подається на вхідні ланцюги аналого-порівняльного блоку 4 та, одночасно, на блок індикації й візуального знімання логічної інформації 11. Ця інформація подається на програмно-аналітичний пристрій 5, куди одночасно подаються сигнали із блоку бібліотеки нормовано-дозволених перевантажень 9. Перетворений сигнал з виходу блоку 5 подається на вхідні ланцюги формувача та класифікації сигналу по кратностям 6, а потім на блок класифікаційного аналізу по продовжностям 7. На цей логічний блок одночасно надходять сигнали з генератора тактових сигналів 8 з метою узгодження аналізуємої інформації. Отримана інформація про перевищення різкозмінного навантаження передається й зберігається в блоці 10 та, одночасно, передається на блок індикації 11, на який також подаються тактові імпульси. Таким чином, здійснюється постійний аналіз об'єкту по параметрах, які перевищують нормовані державними стандартами або нормативно-технічною документацією. З появою в досліджуваному сигналі імпульсів, параметри яких перевищують нормативно допустимі по тривалості, або кратностям, або кількості, у блоці опорних напруг спрацьовують відповідні канали й автоматично здійснюється відповідна класифікація, відповідно до заданих граничних даних.

$$\xi_{M1} = \sum_{i=1}^N \Pi_i(I_{\kappa 3}, I_{\epsilon}, I_n, I_m) + \sum_{j=1}^N \Pi_j(U_{\kappa 3}, U_{\epsilon}, U_n, U_m) \quad \left| \begin{array}{l} k=1,2..n..n+p=Var; \\ q_1 = I_{\kappa 3}; q_2 = U_{\kappa 3}; \\ \beta = A, B, C. \end{array} \right. , \quad (1.86)$$

де Π - кількість струмових впливів різкозмінного навантаження на контрольований об'єкт або трансформаторне обладнання;

I - струм;

k – кількість інтервалів по кратностям нестационарних впливів;

β - кількість досліджуваних фаз;

∂ – класифікація по характерних ознаках струмів включення, коротких замикань, поштовхів технологічного навантаження.

Передбачено можливість регулювання досліджуваних інтервалів по кратностям при одночасній зміні в заданих масштабах. При цьому здійснюється напруг і струмів на коротких замикань, струми включення, поштовхи й кидки струмів, включаючи технологічні короткі замикання відповідно до виразу:

$$\xi_{M3} = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^N \Pi_i(I_{\kappa 3}) + \sum_{j=1}^N \Pi_j(U_{\kappa 3}) \\ \sum_{i=1}^H \Pi_i(I_{\epsilon}) + \sum_{j=1}^H \Pi_j(U_{\epsilon}) \\ \sum_{i=1}^M \Pi_i(I_n) + \sum_{j=1}^M \Pi_j(U_n) \\ \sum_{i=1}^P \Pi_i(I_m) + \sum_{j=1}^P \Pi_j(U_m) \end{array} \right. , \quad (1.87)$$

$$\begin{array}{l} k = 1, 2, \dots, n + p; \\ \beta = A, B, C; \\ q_1 = I_{\kappa 3}; q_2 = U_{\kappa 3}. \end{array}$$

де k - кількість каналів по кратності;

β - фази навантаження;

q - класифікація нестационарних струмів;

$\dot{l}$ - кількість струмів короткого замикання;

j - кількість струмів включення власні й зовнішніх;

Q - поштовхи струмів;

δ - кидки струмів.

1.22 Комп'ютерне моделювання сукупності параметрів навантажень обладнання

Комп'ютерне моделювання сукупності параметрів навантажень і збуджуючому ними електромагнітних процесів в електротехнічному обладнанні доцільно здійснювати на імітаційній (комп'ютерній) моделі. Вона дозволяє імітувати особливості електротехнологічних режимів дугових сталетопних комплексів із використанням пакета програм MatLab/Simulink. Сутність методики полягає в тому, що в ній передбачена можливість імітації різкозмінного характеру навантаження при регульованих несинусоїдальності, несиметрії, струмах технологічних коротких замикань і їх різних варіаціях. Схема моделювання нестационарних електромагнітних процесів наведена на рис. 1.23.

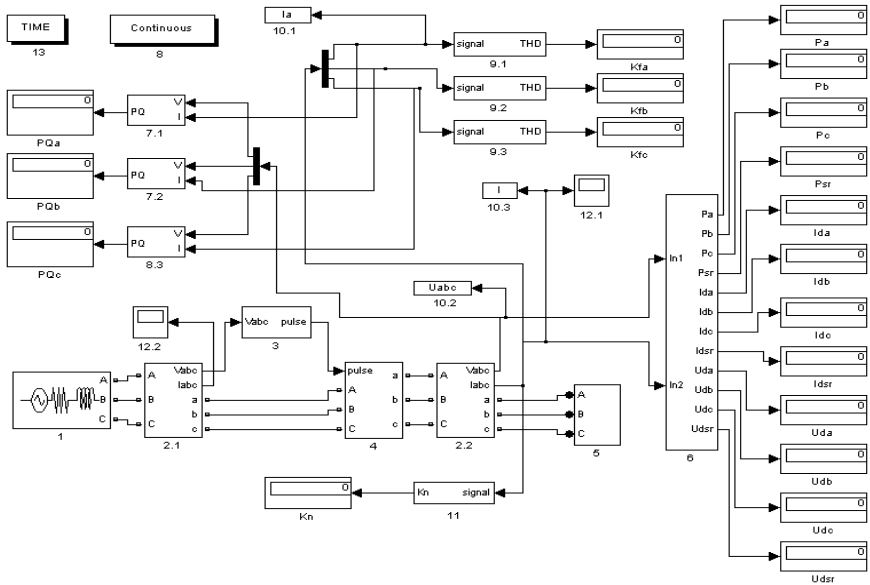


Рисунок 1.23 – Схема комп'ютерного моделювання електромагнітних процесів в електротехнічному обладнанні при різних навантаженнях

На рис. 1.23 прийнято наступні позначення 1 - блок живлення; 2.1,2.2 – вимірювальні блоки; 3 - блок керування формуванням

несинусоїдальності; 4 - формувач несинусоїдальності; 5 - навантаження; 6 - блок аналізу та реєстрації струму і напруги, а також повної потужності; 7.1,7.2,7.3 - блок аналізу активної і реактивної потужності першої гармоніки; 8 - аналізатор гармонічного складу несинусоїдального струму; 9.1,9.2,9.3 - блок аналізу коефіцієнта несинусоїдальності; 10 - блок зберігання і побудови графіків; 11 - блок аналізу несиметрії; 12 - осцилограф; 13 - таймер.

Імовірнісний характер різкозмінних навантажень імітується за допомогою формувачів несиметрії і несинусоїдальності. За допомогою моделі досліджуються параметри електромагнітних процесів залежно від несинусоїдальності і несиметрії збуджуючого струму. Вона дозволяє отримати чисельні значення активної, реактивної і повної потужності в залежності від коефіцієнтів несинусоїдальності і несиметрії струмів та напруг, а також спектральний склад вищих гармонік. Методика дозволяє моделювати різні сполучення й особливості електротехнологічних режимів електротехнічного обладнання. Отримані результати дозволяють вибрати еквівалентні параметри для моделювання додаткових втрат в неактивних елементах і оптимальні електротехнологічні режими електротехнологічного та електротехнічного обладнання. Дослідження впливу нестационарних електромагнітних процесів на умови роботи обладнання дозволяють розробити інженерні методи модернізації електротехнічного обладнання загального призначення до відповідних навантажень електротехнологічних комплексів та енергоємних спеціалізованих пристроїв.

1.23 Приклад програми автоматизованого аналізу технічного стану обладнання

В якості прикладу розглянемо основні етапи програмного аналізу оцінки технічного стану системи збудження електромагнітного поля силового трансформатора з розчіпленим низьковольтними обмотками типу ТРДН-63 МВА, який живить електроприводи дугових сталетопних печей та інші установки електрометалургійного підприємства. В якості початкових даних будемо використовувати експериментальні вимірювання струму, напруги, потужності та частоту.

На практиці ефективно використовувати трирівневу електромагнітну діагностику трансформаторного обладнання [8,9]. На першому рівні експериментально досліджуються рівні і кратності струмів, які перевищують дозволені нормативно технічною документацією та державними стандартами. Якщо вони перевищують нормовані показники, то виконується аналіз даних другого рівня. На цьому рівні виконується аналіз загального рівня шуму та у спектрі рівнів октавних частот. Рівні шуму залежать від магнітострикційних процесів у магнітній системі та резонансних процесів. При наявності відхилень у конструкції трансформаторного обладнання рівні шуму зростають. Якщо рівні шуму перевищують у спектрі низьких октавних частот, то це свідчить про наявність відхилень у масивних деталях. У випадках перевищення рівнів шуму на високих частотах, то відхилення у маломасивних деталях. При наявності суттєвих перевищень рівнів шуму трансформаторне обладнання слід відключити та виконати дослідження третього рівня. На цьому рівні оцінюється наявність деформацій та зміна геометричних розмірів системи обмоток трансформаторів від дії електродинамічних процесів при технологічних та зовнішніх коротких замиканнях. Ці явища супроводжуються великими струмами як по крайностям так і по продовжності та кількості. Таким чином вимірюючи електричні зовнішні навантажувальні параметри можливо оцінити внутрішні електромагнітні.

По динаміці зміни останніх можливо впевнено оцінити технічний стан електротехнічного обладнання.

В якості прикладу на рис.1.24 показано загальний вигляд потужного масляного трансформатора а на рис.1.26 – схема з'єднання високовольтних та низьковольтних обмоток. Розглянемо приклад перетворення міжфазних параметрів навантаження (I , U , P , f) до фазних опорів (X , R) системи збудження електромагнітного поля (обмоток).

Характерною рисою трансформаторів є те, що низьковольтні обмотки виконано розчепленими і кожна із них має свої виводи на зовні бака. Система обмоток з'єднана в баці за схемою, як показано на рисунку 1.26. Технічно доступні тільки їх виводи на зовні баку. Тому для знаходження фазних опорів по вимірних між фазних параметрах необхідно розглянути їх аналітичний зв'язок та на їх підставі розробити програму приведення між фазних параметрів до фазних опорів алгоритм якої показано на рис.1.24.

Алгоритм програми розроблено на язиці програми «Turbo Pascal». Вона може бути використана в автоматизованій системі оцінки технічного стану електротехнічного обладнання. Безпосередньо програма приведена на рис.2-6. В ній враховується приведення отриманих фазних опорів до промислової частоти та однієї температури.

Вона складається з п'яти частин, які між собою пов'язані в логічній послідовності їх прояву в електротехнічному обладнанні в динамічному процесі навантаження. При цьому, доцільно відзначити, що в наведеному прикладі враховуються три рівня параметрів які характеризують поточний технічний стан обладнання.

Перший рівень відображає електричне навантаження та перевищення номінальних параметрів. Другий – рівні шуму. Третій – наявність відхилень в системі збудження електромагнітного поля (обмоток).

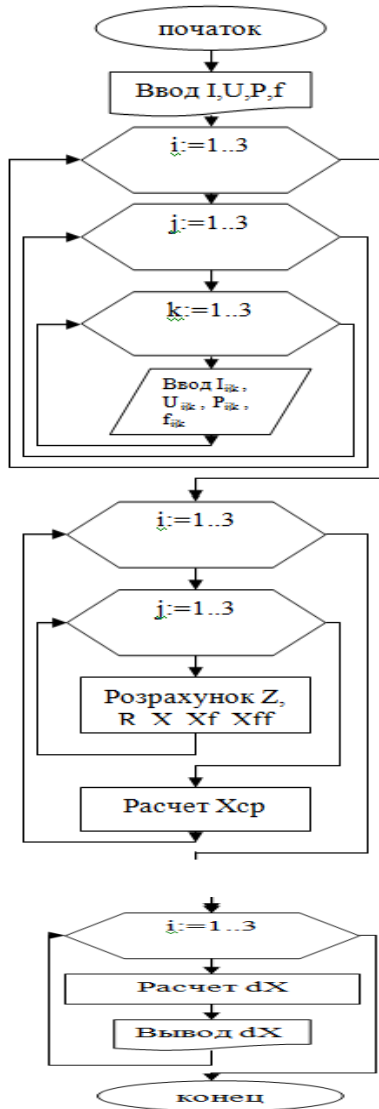


Рисунок 1.24 – Алгоритм програми діагностики обмоток силових трансформаторів по виміряних міжфазним струмах, напрузі, потужності та частоті.

В першу чергу знаходяться постійні коефіцієнти вимірювальних приладів:

$$\begin{aligned}
 f50 &:= 50 \quad Ipr := 20 \quad Npri := 100 \quad Upr := 50 \quad Npru := 100 \quad Ppr := 100 \\
 Nprp &:= 100 \\
 \alpha i &:= \frac{Ipr}{Npri} \quad \alpha u := \frac{Ppr}{Npru} \quad \alpha p := \frac{Ppr}{Nprp} \cdot 0.1 \quad Ppr := IwUw \\
 M &:= D \backslash Sse \backslash mcd \backslash dat.txt \quad M := M^T \\
 NIab &:= M^{<1>} \quad NIbc := M^{<2>} \quad NIac := M^{<3>} \\
 Iab &:= \alpha i \cdot NIab \quad Ibc := \alpha i \cdot NIbc \quad Iac := \alpha i \cdot NIac \\
 Iab &= \begin{pmatrix} 1 \\ 1.1 \\ 1.2 \end{pmatrix} \quad Ibc = \begin{pmatrix} 0.8 \\ 1 \\ 1.2 \end{pmatrix} \quad Iac = \begin{pmatrix} 1.2 \\ 1 \\ 0.9 \end{pmatrix} \\
 NUab &:= M^{<4>} \quad NUbc := M^{<5>} \quad NUac := M^{<6>} \\
 Uab &:= \alpha u \cdot NUab \quad Ubc := \alpha u \cdot NUbc \quad Uac := \alpha u \cdot NUac \\
 Uab &= \begin{pmatrix} 4.5 \\ 4.75 \\ 5 \end{pmatrix} \quad Ubc = \begin{pmatrix} 5 \\ 4 \\ 4.5 \end{pmatrix} \quad Uac = \begin{pmatrix} 5 \\ 5.5 \\ 6 \end{pmatrix} \\
 NPab &:= M^{<7>} \quad NPbc := M^{<8>} \quad NPac := M^{<9>} \\
 Pab &:= \alpha p \cdot NPab \quad Pbc := \alpha p \cdot NPbc \quad Pac := \alpha p \cdot NPac \\
 Pab &= \begin{pmatrix} 1.3 \\ 1.2 \\ 1 \end{pmatrix} \quad Pbc = \begin{pmatrix} 0.8 \\ 0.9 \\ 1 \end{pmatrix} \quad Pac = \begin{pmatrix} 1.1 \\ 1.2 \\ 1.3 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Перша частина програми автоматизованого аналізу та оцінки технічного стану обмоток силових трансформаторів по виміряним струму, напрузі, потужності та частоті полягає в наступному. На першому рівні програми вводяться постійні коефіцієнти вимірювальних приладів, та результати виміряних струму, напруги, потужності і частоти.

Цю частину програми можливо частково модернізувати віносно приладів які будуть використовуватись, а також схеми з'єднання обмоток. Далі виконується розрахунок міжстрижневих

повного опору, його активної та реактивної складових по наступним виразам:

$$\text{a. } Z_{ab} := \overrightarrow{\left(\frac{U_{ab}}{I_{ab}} \right)} \qquad R_{ab} := \overrightarrow{\left(\frac{P_{ab}}{I_{ab}^2} \right)}$$

$$Z_{ab} := \begin{pmatrix} 4.5 \\ 4.318 \\ 4.167 \end{pmatrix} \qquad R_{ab} := \begin{pmatrix} 1.3 \\ 0.992 \\ 0.694 \end{pmatrix}$$

$$X_{ab} = \sqrt{Z_{ab}^2 - R_{ab}^2}$$

$$X_{abf} = \frac{X_{abl_1} + X_{abl_2} + X_{abl_3}}{3}$$

$$kf = \frac{50}{fop}$$

$$X_{abf} = 1.052$$

$$\text{б. } Z_{ab} := \overrightarrow{\left(\frac{U_{ac}}{I_{ac}} \right)} \qquad R_{ab} := \overrightarrow{\left(\frac{P_{ac}}{I_{ac}^2} \right)}$$

$$X_{ac} = \sqrt{Z_{ac}^2 - R_{ac}^2}$$

$$X_{acl} = X_{ac} * kf$$

$$X_{acf} = \frac{X_{acl_1} + X_{acl_2} + X_{acl_3}}{3}$$

$$X_{acf} = 1.328$$

$$\text{в. } Z_{bc} := \overrightarrow{\left(\frac{U_{bc}}{I_{bc}} \right)} \qquad R_{bc} := \overrightarrow{\left(\frac{P_{bc}}{I_{bc}^2} \right)}$$

$$Z_{bc} := \begin{pmatrix} 6.25 \\ 4 \\ 3.75 \end{pmatrix} \qquad R_{ab} := \begin{pmatrix} 1.25 \\ 0.9 \\ 0.694 \end{pmatrix}$$

$$X_{bc} = \sqrt{Z_{bc}^2 - R_{bc}^2} \qquad X_{bcf} = \frac{X_{bc1_1} + X_{bc1_2} + X_{bc1_3}}{3}$$

$$X_{abf} = 1.142$$

Друга частина програми автоматизованого аналізу та оцінки технічного стану обмоток силових трансформаторів по виміряним струму, напрузі, потужності та частоті.

На цьому етапі знаходимо стрижневі реактивні складові опору по експериментальних між стрижневих по наступним формулам:

$$X_{af} = \frac{1}{2} \cdot (X_{abf} + X_{acf} - X_{bcf})$$

$$X_{af} = 0.619$$

$$X_{bf} = \frac{1}{2} \cdot (X_{abf} + X_{bcf} - X_{acf})$$

$$X_{bf} = 0.433$$

$$X_{cf} = \frac{1}{2} \cdot (X_{bcf} + X_{acf} - X_{abf}) \quad X_{af} = 0.709$$

$$X_{cf} = \frac{(X_{af} + X_{bf} - X_{cf})}{3}$$

$$X_{af} = 0.587$$

Третя частина програми автоматизованого аналізу технічного стану обмоток силових трансформаторів по виміряним струму, напрузі, потужності та частоті.

В четвертій частині виконується аналіз фазних реактивних складових опору короткого замикання відносно початкових (які приведено у технічній документації). Якщо такі дані відсутні, то слід усереднювати отримані результати експериментальних досліджень по наступним формулам:

$$\Delta X_a := \frac{X_{af} - X_f}{X_f} \cdot 100$$

$$\Delta X_a = 5.399$$

$$\Delta X_b := \frac{X_{bf} - X_f}{X_f} \cdot 100$$

$$\Delta X_b = -26.232$$

$$\Delta X_c := \frac{X_{cf} - X_f}{X_f} \cdot 100$$

$$\Delta X_c = 20.833$$

<pre> range (l0, up, xa, xb, xc) := s←"" s←concat(s, "deltaXa") if (xa ≥ l0) s←concat(s, "deltaXb") if (xb ≥ l0) s←concat(s, "deltaXc") if (xc ≥ l0) s←concat(num2str(l0), "%<=", s, "<", </pre>	<pre> ^ (xa < up) ^ (xb < up) ^ (xc < up) num2str(up), "%" if s ≠ "" </pre>
--	---

Четверта частина програми автоматизованого аналізу технічного стану обмоток силових трансформаторів по виміряним струму, напрузі, потужності та частоті.

В п'ятій частині програми класифікуються перевищення реактивних складових опору у слідуючій градації: від 0,0÷1,0; 1,0÷1,5; 1,5÷2,0; 2,0 і більше. Ці граничні межі свідчать про наявність відхилень у геометричних розмірах обмоток і характеризують їх технічний стан. Практично трансформатор небезпечно експлуатувати уже в межах 1,5÷2,0. При таких показниках в обмотки мають деформації. Подальша експлуатація призведе до аварійного виходу трансформатора з ладу.

Програмна градація рівнів перевищення реактивних складових опорів приймає наступний вигляд:

```

range(0, 1.0, ΔXa, ΔXb, ΔXc) = ""
range(1.0, 1.5, ΔXa, ΔXb, ΔXc) = ""

```

```
range(1.5, 2.0, ΔXa, ΔXb, ΔXc) = ""
range(2.0, 100, ΔXa, ΔXb, ΔXc) = ""
```

П'ята частина програми автоматизованого аналізу технічного стану обмоток силових трансформаторів по виміряним струму, напрузі, потужності та частоті.

Експериментальні дослідження, та аналіз отриманих результатів на силовому трансформаторі типової потужності 63 МВА та методики приведено в публікаціях [8].

Листинг програми оцінки технічного стану обмоток силового трансформаторного обладнання по міжфазним електромагнітним параметрам:

```
USES crt;
var
i,j,k:integer;

xa,xb,xc,dxa,dxb,dxc,a,Xcp:real;

name: array [1..3] of string;

Xf,Xff,dX:array[1..3] of real;

matr: array[1..3,1..3,1..4] of real;

z,R,X: array[1..3,1..3] of real;
begin
textcolor(white);
name[1]:= 'ab';name[2]:= 'ac';name[3]:= 'bc';
clrscr;
for i:=1 to 3 do
begin
writeln('введите данные для',name[i]);
for j:=1 to 3 do
begin
writeln('введите последовательно I,U,W,f для 'j,'варианта');

for k:=1 to 4 do
```

```

read(matr[i,j,k]);

end;

clrscr;

end;

for i:=1 to 3 do

begin

for j:=1 to 3 do

begin

Z[i,j]:=matr[i,j,2]/matr[i,j,1];

R[i,j]:=matr[i,j,3]/((matr[i,j,1])*(matr[i,j,1]));

X[i,j]:=(sqrt(z[i,j]*z[i,j]-R[i,j]*R[i,j]))*(50/matr[i,j,4]);

Xf[i]:=Xf[i]+X[i,j]/3;

If i=(4-j) then a:=Xf[j]*(-1) else a:=Xf[j];

Xff[i]:=Xff[i]+a;

```

1.24 Приклад діагностики обладнання по поточному аналізу навантаження

На рис.1.25 прийняті наступні позначення: ВН і НН - високовольтні і низьковольтні обмотки; А, В, С и а, в, с, - виводи фаз відповідних обмоток; індекси 1 й 2 позначають першу і другу частини розщепленої низьковольтної обмотки [8].

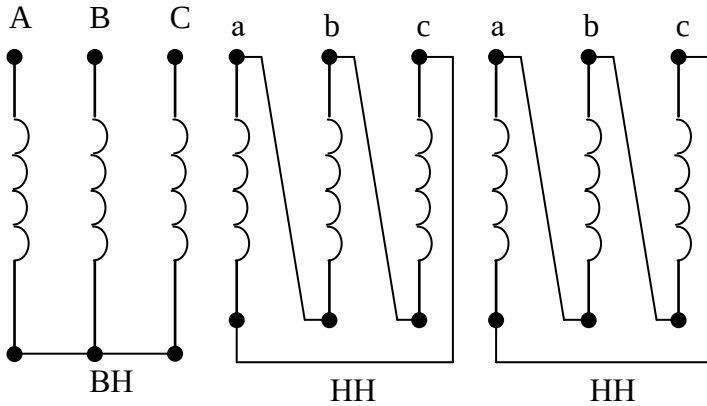


Рисунок 1.25 – Схема з'єднання обмоток мережного трансформатора типової потужності 63 МВА

При даній схемі з'єднання високовольтних і низьковольтних обмоток і однофазному живленні повний опір короткого замикання представимо у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} Z_{AB}(l, \omega) &= Z_A(l, \omega) + Z_B(l, \omega); \\ Z_{AC}(l, \omega) &= Z_A(l, \omega) + Z_C(l, \omega); \\ Z_{BC}(l, \omega) &= Z_B(l, \omega) + Z_C(l, \omega). \end{aligned} \quad (1.88)$$

Оскільки необхідно встановити взаємозв'язок між геометричними розмірами пари обмоток міжфазні опори перетворимо у фазні. Із цією метою, просумував праві і ліві частини системи рівнянь приходимо до наступної рівності:

$$\begin{aligned} Z_{AB}(l, \omega) + Z_{AC}(l, \omega) + Z_{BC}(l, \omega) &= \\ = 2[Z_A(l, \omega) + Z_B(l, \omega) + Z_C(l, \omega)]. \end{aligned} \quad (1.89)$$

Вирішуючи цю систему щодо стрижневих опорів одержимо відповідну систему.

$$\begin{aligned}
Z_A &= [Z_{AB}(l, \omega) + Z_{AC}(l, \omega) - Z_{BC}(l, \omega)] \cdot 0.5; \\
Z_B &= [Z_{AB}(l, \omega) + Z_{BC}(l, \omega) - Z_{AC}(l, \omega)] \cdot 0.5; \\
Z_C &= [Z_{BC}(l, \omega) + Z_{AC}(l, \omega) - Z_{AB}(l, \omega)] \cdot 0.5.
\end{aligned}
\tag{1.90}$$

Оскільки повний опір складається з активної $R(l)$ й реактивної $X(l, \omega)$ складових, як показано вище, при наявності деформацій в обмотках, більше чутливим параметром є реактивний опір. Оскільки останнє залежить і від частоти живлячої напруги, то для досягнення більшої точності в процесі вимірів необхідно неї витримувати постійної. Навіть незначна зміна частоти приводить до неоднозначного розуміння отриманих результатів. Тому обмірюваний реактивний опір варто приводити до однакових умов по температурі й частоті.

$$X_{AB}(l, \omega) = [Z_{AB}^2(l, \omega) - R^2(l)]^{0.5} \cdot k_{fT}, \tag{1.91}$$

де $k_{fT} = 1 + f_{50} \cdot f_{on}^{-1}$ - коефіцієнт приведення до промислової частоти.

Коефіцієнт приведення результатів по температурі поширюється на активний опір, тому його опускаємо. Наведені до однакових умов по частоті і чотирьом дослідом, міжфазні опори перетворимо до наступного виду:

$$\begin{aligned}
X_{AB}(l)_{cp} &= \left[\sum_{n=1}^{n=4} X_{AB}(l, \omega)_i \right] : n; \\
X_{AC}(l)_{cp} &= \left[\sum_{n=1}^{n=4} X_{AC}(l, \omega)_i \right] : n; \\
X_{BC}(l)_{cp} &= \left[\sum_{n=1}^{n=4} X_{BC}(l, \omega)_i \right] : n,
\end{aligned}
\tag{1.92}$$

де n - кількість вимірів у досвіді.

Далі за аналогією із системою (9.2), стрижневі реактивні опори перетворимо до наступного виду:

$$\begin{aligned} X_A(l) &= [X_{ABcp}(l) + X_{ACcp}(l) - X_{BCcp}(l)] \cdot 0.5; \\ X_B(l) &= [X_{ABcp}(l) + X_{BCcp}(l) - X_{ACcp}(l)] \cdot 0.5; \\ X_C(l) &= [X_{BCcp}(l) + X_{ACcp}(l) - X_{ABcp}(l)] \cdot 0.5. \end{aligned} \quad (1.93)$$

Для одержання результатів досліджень у нормованому виді варто визначити середнє значення опору досліджуваного трифазного трансформатора:

$$X_T(l) = [X_A(l) + X_B(l) + X_C(l)] / 3. \quad (1.94)$$

По абсолютному відхиленню реактивного опору $\Delta X(l)$ визначається пара обмоток, в одній з яких має місце деформація:

$$\begin{aligned} \Delta X_A(l) &= [X_A(l) - X_T(l)]: X_T(l); \\ \Delta X_B(l) &= [X_B(l) - X_T(l)]: X_T(l); \\ \Delta X_C(l) &= [X_C(l) - X_T(l)]: X_T(l). \end{aligned} \quad (1.95)$$

Для оперативної обробки і аналізу результатів вимірів розроблені алгоритм і програма перетворення обмірюваних міжфазних зовнішніх електромагнітних параметрів до внутрішніх фазних реактивних опорів.

$$\begin{aligned}
 Z_{AB}(l, \omega) &= Z_A(l, \omega) + Z_B(l, \omega); \\
 Z_{AC}(l, \omega) &= Z_A(l, \omega) + Z_C(l, \omega); \\
 Z_{BC}(l, \omega) &= Z_B(l, \omega) + Z_C(l, \omega).
 \end{aligned}
 \tag{1.96}$$

В якості прикладу на рис.1.26 показано зовнішній вигляд мережного трансформатора потужністю 63 МВА, а на рис. 1.27 та рис. 1.28 – пошкодження зовнішніх обмоток.



Рисунок 1.26 - Зовнішній вигляд потужного трансформатора з масляним охолодженням типової потужності 63МВА

На рис.1.24 показано алгоритм, а нижче - програма приведення вимірюваних зовнішніх міжфазних струму, напруги, потужності і частоти силового трансформатора до внутрішніх стрижневих опорів.

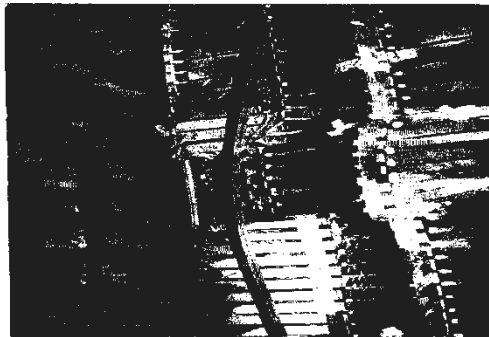


Рисунок 1.27 – Деформація зовнішньої обмотки мережного трансформатора в результаті перевищення навантаження

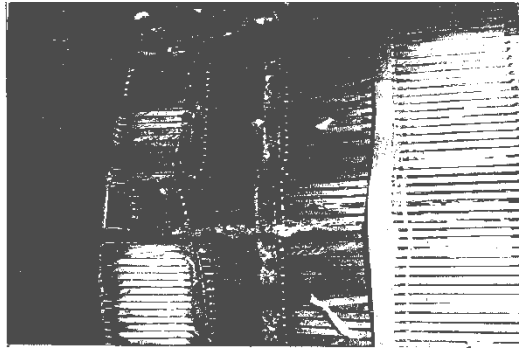


Рисунок 1.28 – Деформація зовнішньої обмотки фази «В».

На приведених рисунках показані приклади пошкоджень мережного трансформатора внаслідок дії електродинамічних процесів при живленні дугових сталетопних печей. При живленні таких печей струми і навантаження в цілому суттєво перевищують нормовані державними стандартами. Внаслідок таких навантажень окремі вузли набувають зниженні показники надійності.

Причинами пошкоджень електротехнічного обладнання можуть бути:

- обвугленням ізоляції, що є наслідком понад нормованих додаткових втрат і нагрівів деталей конструкції, а також розвитком релаксаційних явищ;

- пробої, деформації й ушкодження міжвиткової і повздовжньої ізоляції у результаті перенапруг, втрати діелектричних властивостей і полімеризації ізоляції;

- розпресовка активної частини й втрата електродинамічної стійкості у результаті електротехнологічних і зовнішніх коротких замикань;

- пробої у відводах і між активними й неактивними деталями конструкції, а також заземлюючими контурами в результаті електродинамічних процесів і несиметрії навантаження.

1.25 Діагностика технічного стану обладнання по спектру октавних частот звукової потужності.

Таблиця 1.3 Спектральний склад звукової потужності

Об'єкт		T1				T2			
Шум, дБА		73.0	75.5	70.0	72.0	76	75	73	75.
Тчк №	f, Гц	1	2	3	4	1	2	3	4
Спек-тр октав-них частот, дБА л	31.50	71.0	87.0	67.5	70.0	74	97	72	73.
	63.0	73.5	81.5	75.0	75.0	82	86	78	78.
	125.0	83.0	89.5	85.5	82.0	90	89	86	87.
	250.0	76.5	78.0	76.5	76.5	75	74	75	71.
	500.0	76.0	76.0	65.0	71.5	75	78	73.	75
	1000.	67.0	67.0	67.0	63.5	61	60	59	64.
	4000.	49.0	55.0	50.0	48.0	55	51	47	48
	8000.	40.5	30.0	22.0	42.0	43	41	40	36.

Розглянемо результати експериментального дослідження звукової потужності чотирьох мережних трансформаторів типу ТРДТН-63000/150/35. Ці трансформатори живлять технологічні комплекси з різкозмінним характером навантаження. Під час досліджень працювало три мережних трансформатора, а один знаходився в резерві. Шумові показники вимірювались відповідно до вимог методики державного стандарту ГОСТ 12.2.024-87. Датчики для вимірювання шуму розташовувались з чотирьох боків.

Результати експериментальних досліджень, в систематизованому вигляді, приведено в табл.1.3, а шум в спектрі октавних частот – на рис.1.29 – 1.32.

З метою більшої наглядності на рисунках показано спектральний склад звукової потужності кожного трансформатора в чотирьох точках. Звукові потужності вказаних вище силових трансформаторів представлені в таблиці 1.3.

Загальний рівень шуму і в спектрі октавних частот вимірювались аналізатором спектру і частотних характеристик (шумовимірювачем) типу 00023 виробництва фірми Bryl i Ker.

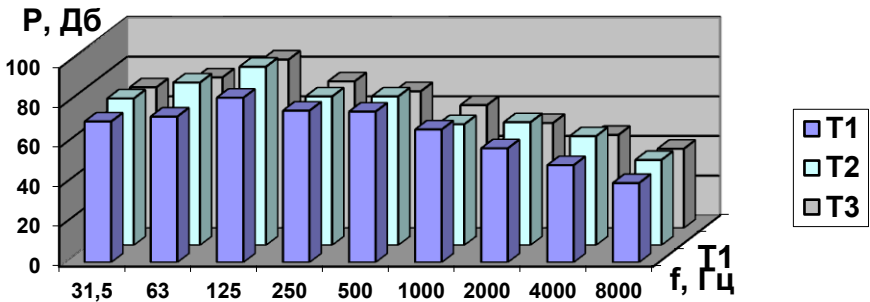


Рисунок.1.29 - Спектральний склад шуму в спектрі октавних частот на стороні низької напруги мережних трансформаторів ТРДН-63МВА

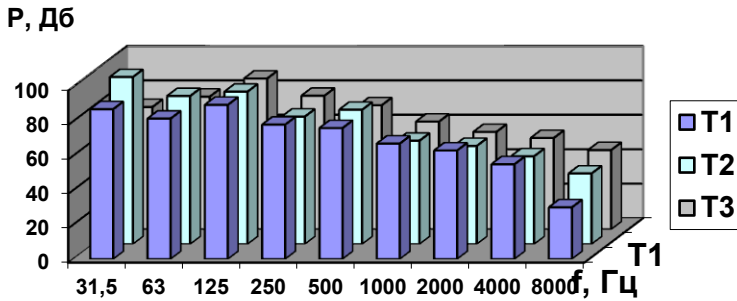


Рисунок 1.30 - Спектральний склад шуму в спектрі октавних частот на стороні високої напруги мережних трансформаторів ТРДН-63МВА

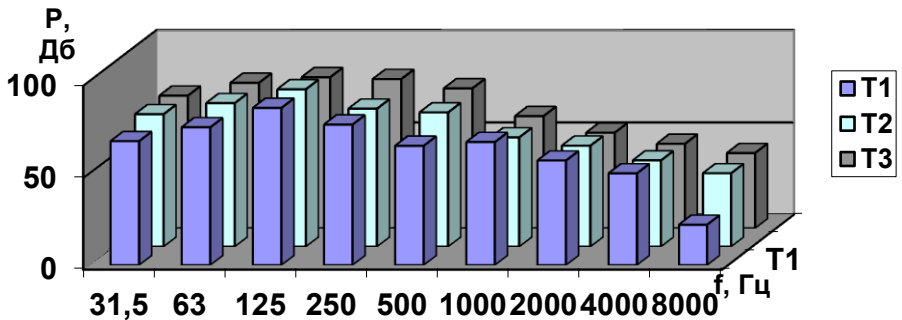


Рисунок 1.31 - Спектральний склад шуму в спектрі октавних частот на стороні РПН мережних трансформаторів ТРДН-63МВА

Тому вони можуть коливатися з більшою власною частотою. Відхилення шуму в межах 31,5 - 500,0 Гц, свідчать про наявність механічних порушень в масивних деталях конструкції та системі охолодження і масивних пресуючих вузлах.

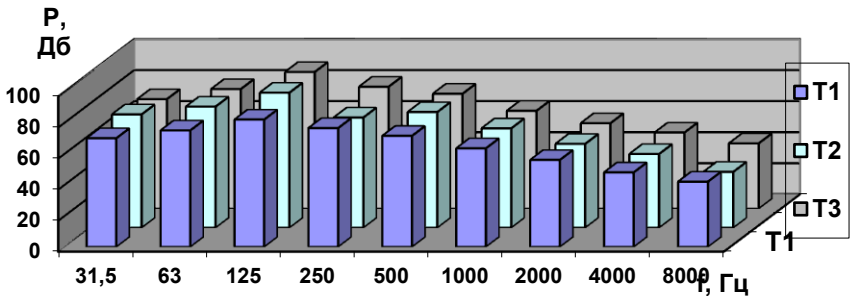


Рисунок 1. 32 - Спектр октавних частот шуму на стороні протилежній РПН силових масляних трансформаторів

З приведених результатів експериментальних досліджень видно, що найбільший рівень звукової потужності, який усереднений по чотирьом точкам вимірювання, спостерігається на мережному трансформаторі T2 і складає 74,75 дБа у порівнянні з T1 (72, 625 дБа) та T3 (72, 375 дБа). Спектральний склад звукової потужності в межах октавних частот на T2 також суттєво відрізняється. Це свідчить про те, що в трансформаторі, під умовним позначенням T2, мають місце часткові порушення технічного стану.

На підставі цих досліджень можливо передбачити, що пошкодженими можуть бути система збудження електромагнітного поля, або пресуючі вузли магнітної системи, або її перші пакети. Це пояснюється тим, що суттєві зміни спостерігаються в межах високих октавних частот звукової потужності, тому що ці деталі мають порівняно малу постійну часу.

Слід нагадати, що звукова потужність формується в результаті магнітострикційних процесів (зміни геометричних розмірів від дії магнітного поля розсіювання) в деталях, які виготовлено із феромагнітних і маломагнітних матеріалів. Для встановлення дійсної причини пошкоджень слід провести електромагнітні дослідження в повному обсязі вимог державного стандарту ГОСТ 3484.1-87. Але очевидно, що подальша експлуатація трансформатора T2 призведе до подальшого розвитку цих явищ і аварійного виходу із ладу.

Наявність змін в спектрі високих частот свідчить про пошкодження немасивних деталей і окремих вузлів. У наведеному вище прикладі такий аналіз досліджень підтвердив наявність пошкодження в системі збудження електромагнітного поля. До недоліку слід віднести те, що звуковий аналіз не дозволяє визначити конкретне місце пошкодження. Його ефективно використовувати в поєднанні з іншими методами оцінки технічного стану обладнання і динаміки зміни електромагнітних параметрів.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАННИХ ДЖЕРЕЛ

1. Надійність техніки. Терміни та визначення: ДСТУ 2860—94. Держстандарт України, 1994. — 91 с.
2. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. ГОСТ 27.002 – 89. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 20 с.
3. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними ДСТУ 3004-95. – К.: Держстандарт України, 1995. – 123 с.
4. Глазунов Л.П. Основы теории надежности автоматических систем управления. Текст / Л.П.Глазунов, В.П.Грабовецкий, О.В.Щербаков // – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 208 с.
5. Половко А. М. Сборник задач по теории надежности. Текст / А.М. Половко, И.М. Маликов // – М.: Сов. радио, 1972. – 408 с.
6. Яншин А.А. Теоретические основы конструирования технологии и надежности ЭВА. Текст/ А. А. Яншин //–М.: Радио и связь, 1983.–312 с.
7. Козлов В. А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. Текст / В. А.Козлов, И. А.Ушаков // – М.: Советское радио, 1985. – 462 с.
8. Зиновкін, В.В. Різкозмінні навантаження та їх вплив на електротехнічне обладнання і методи дослідження: навчальний посібник. Текст / В.В.Зиновкин //-Запоріжжя –ЗНТУ. - 2017.- 374с.
9. Зиновкин В.В. Влияние нестационарных электромагнитных процес сов на электромеханические параметры синхронного электропривода. Текст / В.В.Зиновкин, Н.Л.Антонов, Ю.А.Крисан // Електротехніка і електромеханіка. №2. – 2017. – с.6 – 17.
10. Матвеевский В. Р. Надежность технических средств управления: Учеб. Пос. Текст / В. Р. Матвеевский // – М.: МГИЭМ, 1993.– 92 с.
11. Рудзит Я. А. Основы метрологии, точность и надёжность в приборостроении. Текст / Я. А. Рудзит, В. Н. Плуталов // – М.: Машиностроение, 1991. – 303 с.
12. Липаев В. В. Надёжность программного обеспечения АСУ. Текст / В. В. Липаев // – М.: Энергоиздат, 1981. – 240 с.

13. Шураков В. В. Надёжность программного обеспечения систем обработки данных. Текст / В. В. Шураков // – М.: Финансы и статистика, 1987. – 271 с.

14. Садчиков П. И. Методы оценки надёжности и обеспечения устойчивости функционирования программ. Текст / П. И Садчиков., Ю.Г.Приходько // – М.: Знание, 1983. – 102 с.

15. Майерс Г. Надёжность программного обеспечения. Текст / Г. Майерс // – М.: Мир, 1980. – 360 с.

16. Гласс Р. Руководство по надёжному программированию. Текст / Р Гласс.. // – М.: Финансы и статистика, 1982. – 256 с.

17. Володарський Є. Т. Статистична обробка даних: Навчальний посібник. Текст / Є. Т. Володарський, Л. О.Кошева // – К.: НАНУ, 2008. – 308 с.

18. Федун І. В. Основи теорії надійності та контролю якості виробів електронної техніки: Лабораторний практикум. Текст / І. В.Федун // – Вінниця: ВДГУ, 2003. – 71 с.

19. Трифонюк В.В. Надійність пристроїв промислової електроніки. Текст / В.В.Трифонюк // – К.: Либідь, 1993. - 64с.

20. Гук Ю.Б. Теория надежности в электроэнергетике. Текст / Ю.Б.Гук // – М.: Энергия, 1977. – 536 с.

21. Левин Б.Р. Теория надежности радиотехнических систем. Текст / Б.Р.Левин // – М.: Советское радио, 1987. – 264 с.

22. Авдуевский, Б.В. Надежность и эффективность в технике. Справочник. Текст / Ред. сов. Б.В. Авдуевский В.С., Гнеденко и др. Текст / Математические методы в теории надежности и эффективности. Под ред. Б.В. Гнеденко. // - М.: Машиностроение, 1987. т.2– 280 с.

23. Zinovkin V. Research of electromagnetic parameters of complex electromechanical system under hardly varying loads Variable Load / V. Zinovkin, M. Antonov and I. Krysan // 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 267-272, doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160022.

24. Zinovkin v.v. research of the non-sinusoidal loads impact on the operability of tap-changers contacts / V.V.Zinovkin, O.V. Blyzniakov // Електротехніка та електроенергетика. науковий журнал. – Запоріжжя: НУ «ЗП», 2020. – № 2. – С. 41- 43.

25. Зиновкин В.В. Исследование влияния искажений статорного напряжения асинхронного электропривода с выходными силовыми

фільтрами / В.В. Зиновкин, В.И. Бондаренко, А.В. Соломаха // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2015. – Вип. 15., Т.2. – 382 с. – С.37-45.

26. Зиновкин, В.В. Исследование условий сходимости оптимизационного функционала многопараметрического технологического процесса приготовления магнетитовых огнеупорных изделий / В.В. Зиновкин, В.О. Мирный // Радиоэлектроника, информатика, управление. ЗНТУ: - Запоріжжя, 2015 - №3(34) - С.88-95.

27. Zinovkin V. Research of non-stationary electromagnetic processes in synchronous electric drive / V. Zinovkin, M. Antonov and I. Krysan // "2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)", Kremenchuk, 2017, pp. 148-151, doi: 10.1109/MEES.2017.8248874.

28. Zinovkin V., "Physical simulation of electromagnetic phenomena in transformer equipment under strongly varying loads," / V. Zinovkin, O. Blyzniakov and J. Vasilieva // 2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, 2017, pp. 312-315. doi: 10.1109/MEES.2017.8248919.

29. Zinovkin V., Blyzniakov O., Vasilieva Je. Non-stationary Electromagnetic Processes in power-Intensive Electrical Facilities with Highly Varying Loads / V. Zinovkin, O. Blyzniakov and J. Vasilieva // 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), September 23-25, 2019 Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine, pp. 362-365. DOI: 10.1109/MEES.2019.8896620.

30. Zinovkin V/ Simulation of Static Stability of Synchronous Electric Drive at Hardly Variable Load / V. Zinovkin, M. Antonov, I. Krysan // 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), September 23-25, 2019 Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine, pp. 86 - 89. DOI: 10.1109/MEES.2019.8896368.

31. Zinovkin V. Research of electromagnetic parameters of complex electromechanical system under hardly varying loads Variable Load / V. Zinovkin, M. Antonov and I. Krysan, 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 267-272, doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160022.

32. Zinovkin V.V. Research of the non-sinusoidal loads impact on the operability of tap-changers contacts / V.V.Zinovkin, O.V. Blyzniakov // Електротехніка та електроенергетика. науковий журнал. – Запоріжжя: НУ «ЗП», 2020. – № 2. – С