

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

УДК 621.315

ПОГОДЖЕНО
Директор ННІ енергетики,
автоматики і
енергозбереження

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
інженерії енергосистем

_____ /Каплун В.В./
(підпис)

«_____» _____ 2026 р.

_____ /Антипов Є.О./
(підпис)

«_____» _____ 2026 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему: «Дослідження теплових характеристик болтових струмоведкчих
болтових з'єднань електротехнічного комплекта»**

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

Доцент.к.н.т
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Троханяк В.І.
(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

Доцент.к.н.т
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Кривоносов В.Є
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Яценко Д.С
(ПІБ)

КИЇВ – 2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
інженерії енергосистем

к.т.н доцент _____ Антипов Є.О.
(ступінь, звання) (підпис) (ПІБ)
«___» _____ 2026 р.

**ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ
Яценку Дмитру Сергійовичу**

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської роботи «Дослідження теплових характеристик болтових струмоведучих болтових з'єднань електротехнічного комплекта» затверджена наказом ректора Національного університету біоресурсів і природокористування України від 18.11.2024 р. № 2058 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 22.05.2026 р.
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської роботи: Дослідження теплових режимів струмоведучих болтових з'єднань електротехнічних комплексів з метою підвищення надійності їх експлуатації.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Дослідження математичних моделей теплових процесів у стаціонарних та перехідних режимах роботи з'єднань.
2. Аналіз методів контролю та діагностики технічного стану струмоведучих контактних з'єднань.
3. Проведення експериментального дослідження впливу перехідного опору на температурний стан болтових з'єднань.
4. Розробка рекомендацій щодо підвищення надійності та раннього виявлення аварійних режимів роботи струмоведучих з'єднань.

Перелік графічного матеріалу: презентація виконана в програмному забезпеченні MS Power Point

Дата видачі завдання «___» _____ 2025 р.

Керівник магістерської роботи _____

Завдання прийняв до виконання _____

ЗМІСТ

ВСТУП	4
Розділ 1 АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТА ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У БОЛТОВИХ СТРУМОВЕДУЧИХ З'ЄДНАННЯХ	8
1.1 Загальна характеристика болтових струмоведучих з'єднань.....	8
1.2 Тепловий розрахунок болтового з'єднання.....	12
2.1 Аналіз причини перегріву струмоведучих контактних болтових з'єднань	15
2.2. Розвиток аварійних процесів у контактних з'єднаннях	19
Висновки до розділу 1	20
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ СТАНУ СТРУМОВЕДУЧИХ БОЛТОВИХ З'ЄДНАНЬ	21
2.1 Дослідження функціональної моделі методу контролю струмоведучих болтових з'єднань у сталих режимах	21
2.2 Дослідження функціональної моделі методу виявлення початкового моменту ослаблення болтового з'єднання при випадкових процесах зміни струму навантаження.....	29
2.3 Дослідження функціональної моделі методу контролю болтового з'єднання в перехідному режимі	34
Висновки до розділу 2	40
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ СТРУМОВЕДУЧИХ БОЛТОВИХ З'ЄДНАНЬ.....	42
3.1. Опис експериментальної установки та методика проведення експерименту. Результати експериментальних досліджень та аналіз отриманих результатів	42
3.2. РОЗРОБКА ПРИСТРОЇВ ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДІАГНОСТИКИ СТАНУ СТРУМОВЕДУЧИХ БОЛТОВИХ З'ЄДНАНЬ І КОНТРОЛЮ ЦІЛІСНОСТІ СТРУМОВИХ КІЛ.....	49
Висновки до розділу 3	71
ВИСНОВКИ.....	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	76
ДОДАТКИ.....	79

ВСТУП

Надійність функціонування сучасних електротехнічних комплексів безпосередньо залежить від технічного стану їхніх струмоведучих елементів, які забезпечують передачу, розподіл та комутацію електричної енергії. Одними з найбільш поширених елементів електричних мереж є болтові струмоведучі з'єднання, що широко застосовуються у розподільчих пристроях, силових шафах, трансформаторних підстанціях, комутаційній апаратурі, промислових електроустановках та медичних лабораторних комплексах. Основною перевагою таких з'єднань є їх розбірність, простота монтажу, можливість технічного обслуговування та заміни без пошкодження основних провідникових елементів.

Разом із тим практика експлуатації електротехнічного обладнання свідчить, що саме струмоведучі контактні болтові з'єднання часто стають джерелом аварійних ситуацій, пов'язаних із локальним перегрівом, підвищенням перехідного опору, втратою механічної щільності контакту, електричним пробоем та навіть виникненням пожежонебезпечних режимів. Причинами таких явищ можуть бути механічне ослаблення болтового з'єднання, корозійні процеси, окислення контактних поверхонь, вібраційні впливи, температурні деформації матеріалів, а також нерівномірний розподіл струмового навантаження.

Особливої актуальності проблема надійності струмоведучих контактних з'єднань набуває в умовах сучасної експлуатації електротехнічного обладнання, де системи працюють у режимах змінних, імпульсних та пікових навантажень. У таких умовах процеси нагрівання контактних вузлів мають нелінійний характер, а традиційні методи контролю технічного стану не завжди дозволяють своєчасно виявити початкові стадії деградації контактного з'єднання.

Тепловий стан болтового струмоведучого з'єднання є одним із найбільш інформативних параметрів його технічного стану. Зростання температури контактної вузла безпосередньо пов'язане зі збільшенням перехідного електричного опору, що відповідно до закону Джоуля–Ленца призводить до інтенсифікації тепловиділення. При цьому навіть незначне погіршення якості контакту може викликати суттєве локальне зростання температури, що створює передумови до розвитку аварійного процесу.

У сучасній електроенергетиці все більшого значення набувають методи технічної діагностики, засновані на моніторингу температурного стану струмоведучих з'єднань. Використання теплових методів контролю, цифрових вимірювальних систем та математичних моделей прогнозування дозволяє підвищити ефективність виявлення дефектів на ранніх стадіях їх розвитку. Однак на сьогодні існує необхідність удосконалення методів оцінювання теплових характеристик болтових струмоведучих з'єднань з урахуванням динамічних режимів навантаження, змін температури навколишнього середовища та особливостей конструктивного виконання контактних вузлів.

Актуальність теми магістерської роботи зумовлена необхідністю підвищення надійності та безпеки експлуатації електротехнічних комплексів шляхом дослідження теплових процесів у болтових струмоведучих з'єднаннях, виявлення закономірностей зміни їх температурного стану та вдосконалення методів контролю технічного стану контактних вузлів.

Науково-технічна значущість дослідження полягає у поглибленні уявлень про механізми формування теплових режимів у струмоведучих болтових з'єднаннях, визначенні впливу перехідного опору на динаміку нагріву та створенні передумов для розроблення ефективних методів раннього виявлення аварійних режимів роботи.

Об'єктом дослідження є процеси теплового стану струмоведучих болтових з'єднань електротехнічних комплексів у процесі експлуатації.

Предметом дослідження є теплові характеристики болтових струмоведучих з'єднань, закономірності їх зміни залежно від електричних, конструктивних та експлуатаційних факторів.

Метою магістерської роботи є дослідження теплових характеристик болтових струмоведучих з'єднань електротехнічного комплексу, аналіз причин їх перегріву, математичне моделювання динамічних теплових режимів та експериментальне підтвердження закономірностей зміни температурного стану контактних з'єднань.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні завдання:

- провести аналіз конструктивних особливостей болтових струмоведучих з'єднань та фізичних процесів, що відбуваються в зоні електричного контакту;
- дослідити причини перегріву контактних болтових з'єднань та фактори, що впливають на зміну їх теплових характеристик;
- виконати аналіз існуючих методів контролю технічного стану струмоведучих контактних з'єднань;
- розробити та дослідити математичні моделі теплових режимів болтових струмоведучих з'єднань у стаціонарних та перехідних режимах;
- дослідити можливість визначення початкового моменту ослаблення контактного з'єднання за температурними параметрами;

- провести експериментальні дослідження теплового стану струмоведучих болтових з'єднань при різних значеннях перехідного опору;
- виконати аналіз результатів експериментальних досліджень та оцінити можливість їх практичного застосування;
- сформулювати рекомендації щодо підвищення надійності роботи струмоведучих контактних з'єднань електротехнічних комплексів.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань у роботі використано комплекс теоретичних та експериментальних методів дослідження, зокрема методи математичного моделювання теплових процесів, елементи теорії електричних контактів, методи аналізу електричних кіл, статистичні методи обробки експериментальних даних, методи технічної діагностики та експериментальні методи вимірювання електричного опору й температури контактних з'єднань.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у дослідженні закономірностей зміни теплових характеристик болтових струмоведучих з'єднань залежно від величини перехідного опору, умов навантаження та температури навколишнього середовища, а також у вдосконаленні підходів до теплового контролю технічного стану контактних з'єднань.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання отриманих залежностей та результатів досліджень для вдосконалення систем технічного контролю електрообладнання, підвищення надійності електропостачання, попередження аварійних ситуацій та впровадження автоматизованих систем моніторингу технічного стану струмоведучих з'єднань.

Розділ 1 АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТА ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У БОЛТОВИХ СТРУМОВЕДУЧИХ З'ЄДНАННЯХ

1.1 Загальна характеристика болтових струмоведучих з'єднань

Болтові струмоведучі з'єднання застосовують у розподільних пристроях, на шинах, у з'єднувачах проводів, між наконечниками та апаратами для передачі електричного струму. Такі з'єднання є розбірними, що забезпечує можливість монтажу, огляду, демонтажу та заміни елементів без руйнування провідників.

Основні типи матеріалів: мідь, алюміній та їх сплави, іноді з олов'яним або іншим покриттям для зменшення корозії та перехідного опору. Конструктивно з'єднання включають болт, гайку, шайби (звичайно, пружні), а також з'єднувані шини або наконечники. **Конструкція та принцип роботи болтових з'єднань**

Типове болтове з'єднання шин складається з двох шин (або шини та наконечника), болта, гайки й шайб, які затягуються з заданим моментом. Площа фактичного контакту складається з окремих контактних ділянок, розташованих у місцях зчіплення шорстких поверхонь.

Затягування болта створює стискове зусилля, яке збільшує кількість контактних точок і зменшує перехідний опір, проте надмірне зусилля може призвести до пластичних деформацій і зменшення пружних властивостей з'єднання. При роботі через з'єднання протікає струм, частина енергії витрачається на нагрівання контакту, що визначає основну теплову характеристику.

Класифікація та призначення болтових контактних з'єднань

Болтові з'єднання є найбільш розповсюдженим типом розбірних контактів в електротехнічних комплексах: розподільчих пристроях, трансформаторних підстанціях, шафах керування та на шинах різних рівнів напруги. Їх надійність безпосередньо впливає на стабільність роботи всієї енергосистеми, оскільки вони зазвичай включаються в силові ланцюги передачі та розподілу електроенергії.^{[1][2]}

Основні типи болтових з'єднань:

- **Шина–шина** — з'єднання плоских провідників (мідних або алюмінієвих шин), які використовуються в розподільчих шинах ОРП, шафах КРУ тощо.^{[2][1]}
- **Шина–вивід апарата** — приєднання шин до прохідних ізоляторів, вимикачів, роз'єднувачів, трансформаторів та інших комутаційних пристроїв.^{[3][2]}
- **Кабельний наконечник–шина** — термінування кабельних ліній через болтові з'єднувачі або наконечники, які приєднуються до шини або виводу апарата.^{[4][3]}

Серед переваг болтових з'єднань — розбірність, можливість контролю стиску, відносно простий монтаж і демонтаж, а також універсальність у використанні для різних матеріалів (мідь, алюміній, сплави).

Перехідний опір і тепловиділення в болтових з'єднаннях

Перехідний опір контактного з'єднання залежить від матеріалу, шорсткості поверхні, розподілу контактного тиску, ступеня окислення та наявності захисних покриттів. Зі збільшенням температури опір матеріалу зростає, що можна описати через температурний коефіцієнт опору γ :

$$R_k(t_2) = R_k(t_1)[1 + \gamma(t_2 - t_1)],$$

де $R_k(t_1)$ — перехідний опір при початковій температурі, t_1, t_2 — температура, для якої оцінюється опір.

Тепловиділення в з'єднанні визначається законом Джоуля–Ленца:

$$Q = I^2 R_k t,$$

де I — струм, R_k — перехідний опір, t — час. Чим більший перехідний опір, тим інтенсивніше нагрівання, особливо при тривалому навантаженні.

Фізика електричного контакту та перехідний опір

Головною тепловою й електричною характеристикою будь-якого з'єднання є **перехідний опір** $R_{\text{пер}}$. Важливо розуміти, що фактична площа електричного контакту значно менша за геометричну площу стикування шин, оскільки реальні поверхні є шорсткими на мікроскопічному рівні.^{[6][7]}

Плями стягування

Через мікроскопічні нерівності поверхонь (мікрорельєф) контакт відбувається лише у окремих точках, які називають **α -плямами**. Електричний струм, протікаючи через з'єднання, «стягується» до цих плям, що призводить до зростання локального опору та концентрації теплових втрат.^{[7][6]}

Перехідний опір розраховується за формулою, що відображає залежність від матеріалу і стиску:

$$R_{\text{пер}} = \frac{\rho_{\text{кон}}}{n} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot H}{4 \cdot P_{\text{ст}}}},$$

де:

- $\rho_{\text{кон}}$ — питомий опір контактового матеріалу;

- n — кількість контактних плям;
- H — твердість матеріалу поверхні;
- P_{ct} — сила стискання, створювана болтом.^{[6][7]}

Чим вища сила стискання й менша твердість, тим більше контактних плям і нижчий R_{per} , але при цьому важливо враховувати механічні межі міцності матеріалів.^{[8][6]}

Фактори, що впливають на теплові характеристики

Тепловий стан болтового з'єднання визначається балансом між виділенням тепла (ефект Джоуля–Ленца) та його відведенням у навколишнє середовище через конвекцію, теплопровідність і випромінювання.^{[9][6]}

Ключові фактори:

- **Сила стискання / момент затягування болта** — недостатній стиск призводить до зростання перехідного опору й інтенсивного нагрівання, надмірний — до пластичних деформацій болта, шини або шайби.^{[10][8]}
- **Окислення контактних поверхонь** — особливо характерно для алюмінієвих шин, які швидко покриваються діелектричною плівкою Al_2O_3 , що підвищує R_{per} і сприяє перегріву.^{[11][3]}
- **Гальванічна корозія** — виникає при прямому контакті міді з алюмінієм у присутності вологи; це призводить до руйнування контактного шару, збільшення опору та додаткового нагрівання.^{[12][11]}

Для зменшення цих ефектів застосовують очищення поверхонь, контактні пастки, плаковані (мідно-алюмінієві) перехідні пласти та покриття (олово, срібло, цинк).^{[11][3]}

Конструктивні елементи болтового вузла

Для забезпечення стабільних теплових характеристик болтовий вузол містить ряд стандартних елементів:

- **Сталевий болт та гайка** — з класом міцності не нижче 8.8 для енергетичних установок, що забезпечує необхідний рівень стиску без ризику руйнування.^{[13][8]}

- **Пласкі шайби** — розподіляють тиск по площі, запобігають деформації країв шини або наконечника.^{[13][1]}

- **Пружинні шайби (Гровера) або тарілчасті пружини** — компенсують температурні розширення матеріалів, особливо важливо при використанні алюмінію з коефіцієнтом лінійного розширення, вищим, ніж у сталевих болта.^{[10][13]}

При циклічному нагріванні й охолодженні алюмінієві елементи розширюються сильніше, ніж сталь; без пружинної шайби при охолодженні з'єднання може ослабнути, що веде до зростання R_{per} і аварійного перегріву при наступному навантаженні.^{[12][10]}

1.2 Тепловий розрахунок болтового з'єднання

Тепловиділення в контактному з'єднанні визначається законом Джоуля–Ленца:

$$Q = I^2 \cdot R_{\text{per}} \cdot t,$$

де I — струм, R_{per} — перехідний опір, t — час.^{[14][6]}

У сталому температурному режимі температура контакту може бути оцінена через тепловий баланс:

$$\tau_{\text{max}} = \tau_{\text{amb}} + \frac{P_{\text{loss}}}{k \cdot S},$$

де:

- $\tau_{\max}$ — максимальна температура з'єднання,
- τ_{amb} — температура навколишнього середовища,
- $P_{\text{loss}} = I^2 R_{\text{per}}$ — потужність втрат,
- k — коефіцієнт тепловіддачі,
- S — ефективна площа поверхні охолодження з'єднання. ^{[15][9]}

Таблиця 1 нижче узагальнює типові граничні температури для болтових з'єднань згідно з нормативами. ^{[2][9]}

Таблиця 1. Граничні температури нагріву болтових з'єднань (з наближенням до норм)

Тип з'єднання	Матеріал	Допустима температура, °C	Примітка
Болтове без покриття	Мідь / алюміній	70–80	Загальні електроустановки, відкрите повітря ^[2]
Зі срібним покриттям	Мідь	до 105	Знижується окиснення, твердість ^[9]
Зі лудінням (олово)	Мідь / алюміній	90–105	Захист від окислення й гальванічної корозії ^[11]

Методи діагностики теплового стану

Для контролю болтових з'єднань використовують методи неруйнівного контролю та лабораторних вимірювань:

- **Інфрачервона термографія (тепловізія)** — дозволяє виявляти «гарячі точки» на працюючих з'єднаннях без відключення обладнання; використовується в розподільчих пристроях, КРУ, трансформаторних підстанціях.^{[16][2]}

- **Вимірювання падіння напруги / за допомогою мікроомметра** — дозволяє прямо визначити перехідний опір $R_{\text{пер}}$ і порівнювати його з нормативними значеннями.^{[7][6]}

Для оцінки стану з'єднань за допомогою тепловізії часто використовують перерахунок надлишкової температури до умовного струму $0,5 I_{\text{ном}}$:

$$\Delta T_{0.5} = c \cdot \Delta T_{\text{наближена}},$$

де $\Delta T_{\text{наближена}}$ — виміряна надлишкова температура при певному навантаженні, а c — коефіцієнт перерахунку, що враховує закон залежності тепловтрат від квадрату струму.^{[16][2]}

Вплив експлуатаційних умов на теплові характеристики

Крім конструктивних факторів, значний вплив на тепловий стан має середовище експлуатації та режим навантаження.^{[9][12]}

- **Вологість, соляний туман, агресивні середовища** прискорюють корозію контактних поверхонь, особливо при мідно-алюмінієвих з'єднаннях без захисту, що призводить до збільшення $R_{\text{пер}}$ і перегріву.^{[11][12]}

- **Режим навантаження** — при тривалому підвищенні струму вище номінального перехідні опори «відкритих» з'єднань ростуть нелінійно через зростання температури, а тепловізійний контроль стає критичним.^{[14][9]}

Для зниження ризику рекомендується використовувати герметизацію з'єднань, контактні мастила, термінову заміну з'єднань із вираженим перегріванням або високим R_{per} .^{[6][11]}

2.1 Аналіз причини перегріву струмоведучих контактних болтових з'єднань

Надійність та безпека струмоведучих контактних болтових з'єднань

Вимоги, що пред'являються до надійності і безпеки електропостачання систем електротехнічного обладнання (СЕТО) промислових комплексів і медичних лабораторій, досліджені в роботах [2–5]. Однак у зазначених роботах недостатньо розглянуті питання захисту електрообладнання електротехнічних комплексів (ЕО ЕТК) при виникненні пошкоджень у мережі живлення та струмоведучих з'єднаннях.

Однією з основних причин простою обладнання є ослаблення струмоведучого з'єднання [3], що призводить до його перегріву, вигорання з'єднання, пошкодження комутаційної апаратури та виникнення коротких замикань у системі електропостачання. У роботах [4, 5] досліджені причини перегріву контактних з'єднань, а також запропоновані методи і пристрої контролю контактних з'єднань струмоведучих частин.

Головні струмоведучі провідники електрообладнання, у тому числі вимикачів, можуть перегріватися в будь-якому електрообладнанні, особливо в місцях контактних болтових з'єднань. Така ситуація потребує особливої уваги як з точки зору пожежної безпеки та цілісності обладнання, так і з точки зору безпеки обслуговуючого персоналу.

Серед основних причин перегріву можна виділити підвищений перехідний опір унаслідок поганого контактного з'єднання. Точки нагріву можуть виникати через:

- окислення або корозію контактних поверхонь;

- несправність компонентів;
- вплив динамічних струмових навантажень;
- коливання температури навколишнього середовища;
- ослаблення контактного з'єднання.

Такими точками найчастіше є:

- роз'ємні та нероз'ємні контактні болтові з'єднання;
- затискачі у струмопроводах;
- головні струмоведачі контакти у комутаційних електроапаратах;
- точки болтового приєднання головних шин до вимикача [6].

Теплові втрати у струмоведачих з'єднаннях

Потужність теплових втрат у струмопроводі визначається за формулою [7]:

$$P = I^2 \cdot R \cdot k,$$

де:

- I – струм, який протікає у провіднику;
- R – активний опір провідника;
- k – коефіцієнт додаткових втрат, що враховує явище поверхневого ефекту та ефекту близькості.

Активний опір провідника визначається співвідношенням:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{q},$$

де:

- ρ – питомий опір матеріалу провідника;
- l – довжина провідника;
- q – площа поперечного перерізу провідника.

Із наведених співвідношень видно, що значний вплив на величину теплових втрат має активний опір провідника. Особливо важливим параметром є площа поперечного перерізу q , яка суттєво зменшується у випадку нещільного прилягання контактних поверхонь через недостатнє зусилля затяжки або наявність оксидної плівки в місці з'єднання.

Це пояснюється тим, що поверхні контактного болтового з'єднання не є ідеально рівними, а струм проходить через велику кількість окремих точок контакту. Залежність активного опору контактної зони можна виразити таким чином:

$$R_k = f(F_k, S_k, \rho, T),$$

де:

- F_k – сила контактної натискання;
- S_k – площа фактичного контакту;
- ρ – питомий опір матеріалу;
- T – температура контактної зони.

Особливості роботи контактних болтових з'єднань

Електричні контакти є слабкою ланкою в будь-яких системах розподілу енергії, управління промисловими процесами та машинами у всіх галузях людської діяльності — від енергетики до космічної техніки. Тому забезпеченню їх надійності та моніторингу приділяється все більша увага [51–57].

Термін служби пристроїв електропостачання, діагностика стану яких ускладнена, значно менший за нормативний. Одним із слабких місць діагностики і контролю пристроїв електропостачання є місця необґрунтованого підвищеного нагріву, зокрема контактні болтові з'єднання.

Для збирання в електричне коло шин, проводів і кабелів зі струмопровідними жилами з міді, алюмінію та його сплавів широко використовуються контактні болтові з'єднання (КБЗ). Такі з'єднання характеризуються:

- високою несучою здатністю;
- надійністю;
- простотою монтажу;
- можливістю демонтажу;
- зручністю заміни окремих деталей.

Різьбові з'єднання становлять понад 60 % деталей, що входять до складу електроустановок. Використання різьбових з'єднань дозволяє забезпечувати необхідні розрахункові зусилля у контакт-деталях.

Основним недоліком таких з'єднань є локальна концентрація механічних напружень на ділянках різьблення малої площі, що з часом призводить до ослаблення зусилля контактного натискання. Особливо це проявляється:

- при вібраціях;
- при коливаннях температури;
- під впливом циклічних механічних навантажень, характерних для умов експлуатації ЕО ЕТК.

За даними [6], аварійність в електричних мережах через порушення роботи контактних з'єднань становить близько 10 % від загального числа аварій.

Особливістю контактування двох тіл є те, що поверхня матеріалу ніколи не є ідеально плоскою. Якщо дотичні елементи вважати абсолютно жорсткими, то дотик відбувається не більше ніж у трьох точках. У реальних КБЗ у результаті дії тиску в контактній зоні завжди виникає пластична або пружна деформація контактуючих елементів [7, 8].

Таким чином, виникнення контакту твердих тіл зводиться до утворення на їх поверхні провідних ділянок, у результаті чого в зоні контакту з'являється так званий перехідний опір, що викликає перегрів. Механізми провідності при цьому можуть мати різну природу [9–11].

2.2. Розвиток аварійних процесів у контактних з'єднаннях

Проведені дослідження [5] показали, що при недостатній площі контакту між провідниками у місцях контакту внаслідок підвищення температури починається локальний нагрів ділянки поверхні контактів.

Якщо площа ділянки контакту менша за деяке критичне значення, у контактній зоні починається проходження численних електричних розрядів.

У роботі [6] представлені результати обстеження контактних з'єднань шин в умовах експлуатації. Встановлено, що після 10–16 місяців роботи з початку пуску у 40 % з'єднань температура піднялася до 150 °С і вище, тоді як температура шин, що підводяться, становила лише 80–90 °С.

На початковій стадії ослаблення КБЗ розвиток аварійної ситуації може протікати тривалий час без видимих змін. Однак різке збільшення перехідного опору супроводжується:

- інтенсивним виділенням тепла;
- появою електричної дуги;
- переміщенням дуги під дією магнітних сил;
- виникненням загоряння електроустановки [24].

Таким чином, перегрів контактних болтових з'єднань є одним із найбільш небезпечних факторів експлуатації електрообладнання, який може призводити до серйозних аварійних ситуацій та виходу обладнання з ладу.

Методи контролю стану контактних болтових з'єднань

Основним методом неруйнівного контролю визначення цілісності КБЗ є тепловий контроль — контактне та безконтактне вимірювання температури контактних болтових з'єднань.

Також широко використовується електричний метод контролю, який полягає у вимірюванні омичного опору КБЗ.

У більшості випадків зазначені вимірювання проводяться в рамках системи оглядів та планово-попереджувального ремонту електрообладнання [29, 30, 196, 217–219].

Застосування методів теплового та електричного контролю дозволяє:

- своєчасно виявляти дефекти контактних з'єднань;
- попереджати аварійні режими роботи;
- підвищувати надійність систем електропостачання;
- забезпечувати пожежну безпеку електроустановок;
- зменшувати ризик виходу з ладу електротехнічного обладнання.

Висновки до розділу 1

У результаті проведеного аналізу встановлено, що основною причиною перегріву струмоведучих контактних болтових з'єднань є збільшення перехідного опору внаслідок ослаблення контактного натискання, окислення поверхонь та зменшення фактичної площі контакту.

Доведено, що тривала експлуатація КБЗ в умовах вібрацій, температурних коливань і циклічних навантажень призводить до погіршення електричного контакту та виникнення локальних зон перегріву.

Аналіз літературних джерел показав, що найбільш ефективними методами контролю стану КБЗ є теплові та електричні методи неруйнівного контролю, які дозволяють своєчасно виявляти дефекти та попереджати розвиток аварійних ситуацій.

Отримані результати можуть бути використані для подальшої розробки методів діагностики та систем моніторингу стану контактних болтових з'єднань у системах електропостачання.

РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ СТАНУ СТРУМОВЕДУЧИХ БОЛТОВИХ З'ЄДНАНЬ

2.1 Дослідження функціональної моделі методу контролю струмоведучих болтових з'єднань у сталих режимах

Функціональна структура методу визначення початкового моменту ослаблення струмоведучих болтових з'єднань (СБЗ) полягає в наступному:

1. Виявлення ділянок стаціонарності контрольованих параметрів: температури СБЗ, струму навантаження та температури навколишнього середовища.
2. Контактне вимірювання температури СБЗ — $T_{убз}$.
3. Вимірювання струму, що протікає через СБЗ, та визначення розрахункового значення температури справного СБЗ — $T_{сі}$.
4. Вимірювання температури навколишнього повітря — $T_{нс}$.
5. Коригування розрахункового значення температури справного СБЗ $T_{кр}$ з урахуванням зміни температури навколишнього повітря.
6. Порівняння значень температур $T_{кр}$ і $T_{убз}$.
7. У разі перевищення розрахункової температури СБЗ робиться висновок про збільшення перехідного опору СБЗ, що є критерієм визначення початкового моменту розвитку аварійної ситуації.
8. При досягненні температурою СБЗ визначеного критичного значення здійснюється відключення обладнання від мережі.

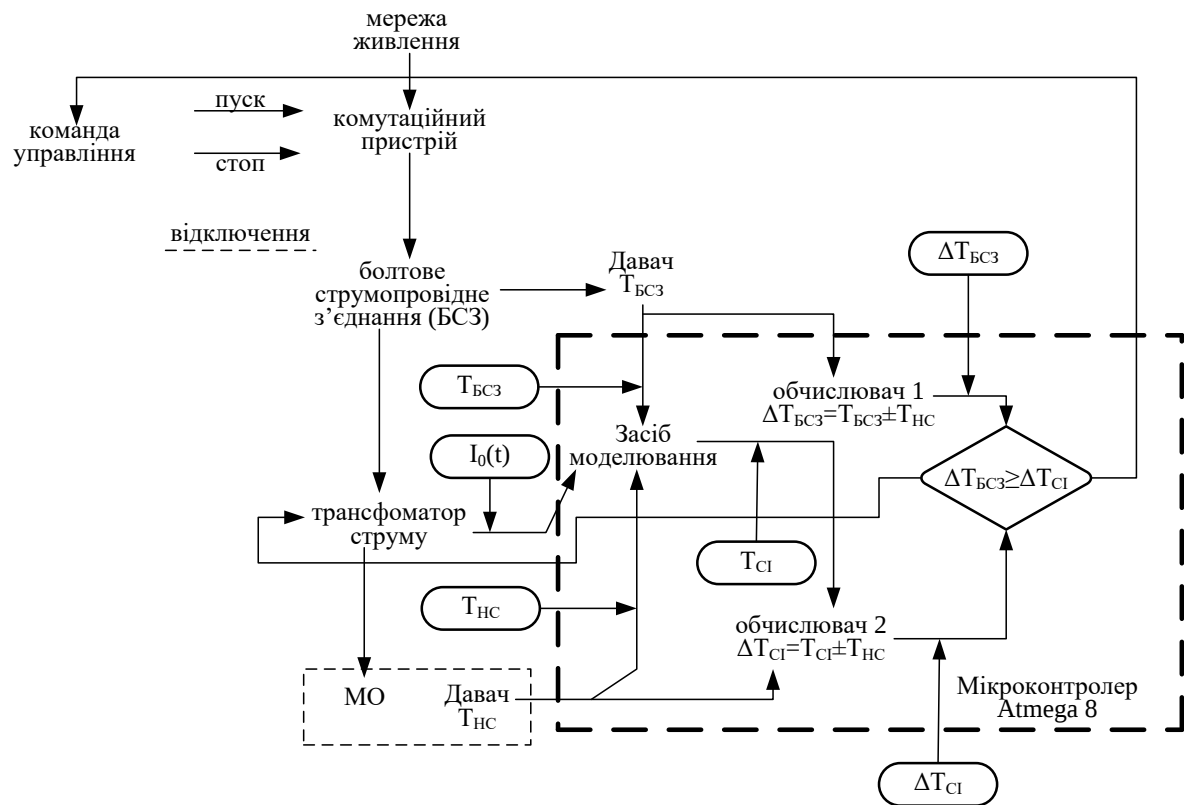


Рисунок 2.1 – Функціональна модель методу визначення початкового моменту ослаблення СБЗ

Графічна інтерпретація методу виявлення початкового моменту ослаблення СБЗ наведена на рисунку 2.2.

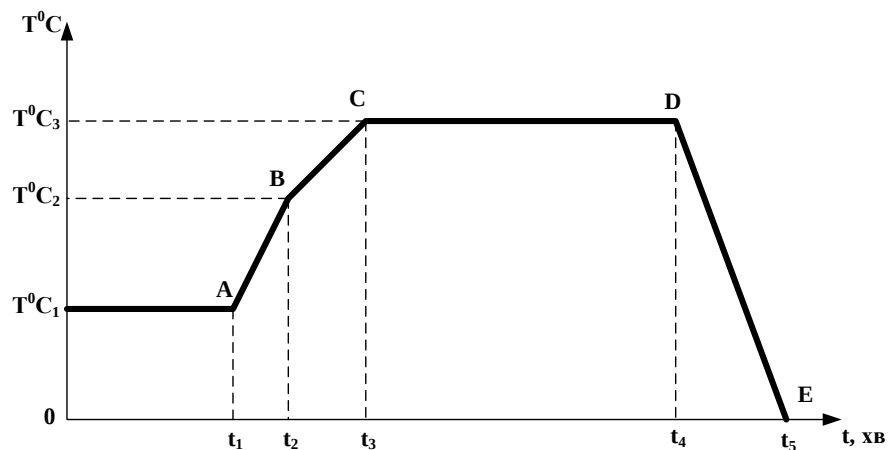


Рисунок 2.2 – Графічна інтерпретація методу виявлення початкового моменту ослаблення СБЗ

- Діапазон $(0-T_{0C1})$ і $(0-t_1)$ – робочий діапазон роботи обладнання.

- Діапазон АВ ($T_{0C1}-T_{0C2}$)і (t_1-t_2)– передаварійна ситуація.
- Діапазон ВС ($T_{0C2}-T_{0C3}$)і (t_2-t_3)– початок розвитку аварійного режиму.
- Діапазон CD (T_{0C3})і (t_3-t_4)– аварійна ситуація.
- Діапазон DE ($T_{0C3}-0$)і (t_4-t_5)– катастрофа та вихід обладнання з ладу.

Процес нагріву СБЗ, викликаний втратами в з'єднанні при протіканні струму навантаження, з достатньою для практичних цілей точністю описується диференціальним рівнянням нагріву однорідного тіла. Розв'язок рівняння має вигляд:

$$T_{\text{бз}} = T_{\text{убз}} - (T_{\text{убз}} - T_{\text{нач}})e^{-t/\tau} \quad (3.1)$$

де:

- $T_{\text{бз}}$ – температура СБЗ;
- $T_{\text{убз}}$ – температура СБЗ у сталому режимі;
- τ – постійна нагріву СБЗ;
- $T_{\text{нач}}$ – початкова температура СБЗ.

Температура СБЗ у сталому режимі з урахуванням зміни температури навколишнього середовища визначається виразом:

$$T_{\text{убз}} = \frac{I_{\text{нагр}}^2}{\alpha F} (R_{\text{бс}} + R_{\text{пр}}) + 24^\circ\text{C} + \Delta T \quad (3.2)$$

де:

$$\Delta T = T_{\text{нс}} - 24^\circ\text{C}$$

- $I_{\text{нагр}}$ – струм навантаження;

- $R_{\text{бс}}, R_{\text{пр}}$ – відповідно опір матеріалу СБЗ та перехідний опір;
- $T_{\text{нс}}$ – температура навколишнього середовища.

Функціональна залежність між параметрами реалізованого методу має вигляд:

$$T_{\text{убз}} = f(I_{\text{нагр}}^2, (R_{\text{бс}} + R_{\text{пр}}), T_{\text{нач}}, \Delta T) \quad (3.3)$$

Для оцінки залежності температури болтового з'єднання від температури навколишнього повітря при різних значеннях струмів навантаження були проведені аналітичні та натурні дослідження.

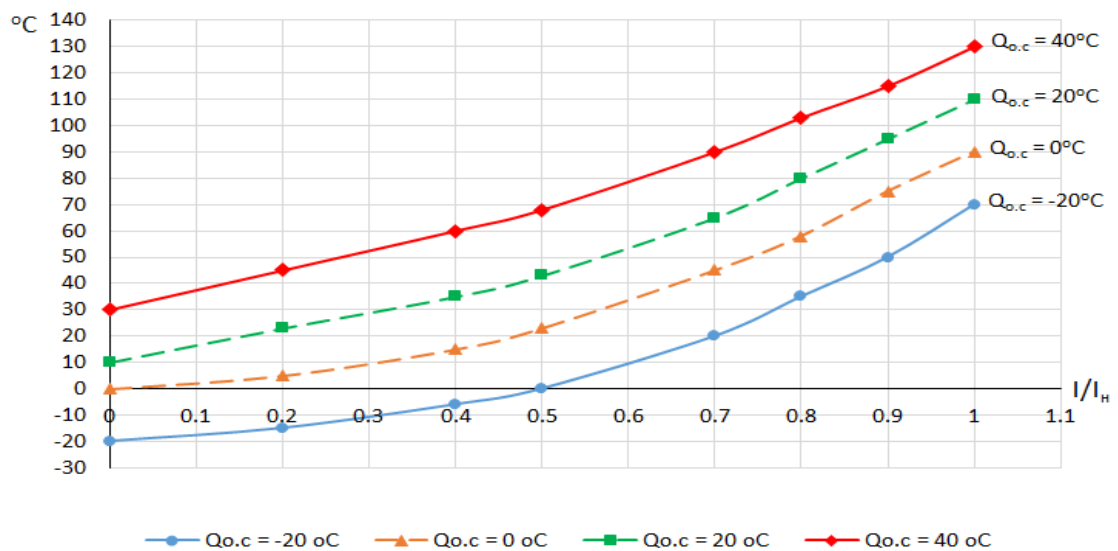


Рисунок 2.3 – Графік залежності температури СБЗ при протіканні струмів навантаження і температурі навколишнього повітря $T_{\text{убз}}, I_n, T_{\text{нс}}$

У сталому режимі температура СБЗ лінійно залежить від зміни температури навколишнього повітря.

На рисунку 2.4 наведено графік зміни температури СБЗ для різних значень:

$$K_r = \frac{R_{\text{ос}}}{R_{\text{нор}}}$$

де $R_{\text{ос}}$ і $R_{\text{нор}}$ – відповідно опір ослабленого та справного болтового з'єднання.

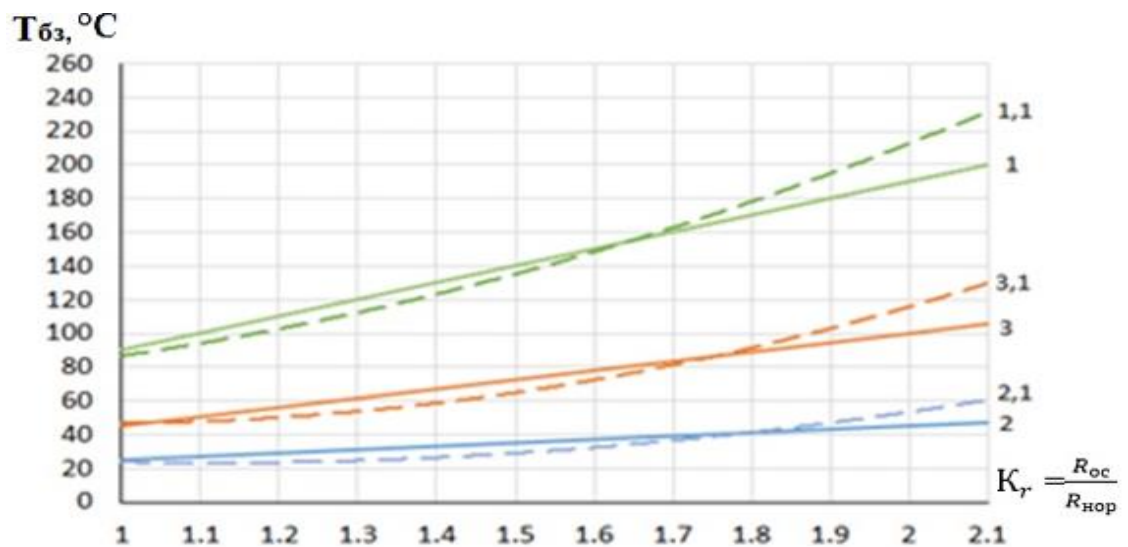


Рисунок 2.4 – Графік зміни температури СБЗ

Аналіз отриманих результатів показав, що розбіжність між аналітичними та експериментальними дослідженнями для номінального значення струму навантаження не перевищує 1 %, що дозволяє використовувати аналітичну залежність у реалізації розроблених способів та пристроїв визначення початкового моменту ослаблення СБЗ.

Для виявлення початкового моменту ослаблення СБЗ використовуються тестові оціночні булеві функції.

Аргументи булевих змінних

$$X_1 = 0$$

— при відсутності струму;

$$X_1 = 1$$

— при протіканні струму через СБЗ.

$$X_2 = 0$$

— при виконанні нерівності:

$$(T_{cl} + (24^{\circ}\text{C} - T_{\text{нс}})) > T_{\text{бз}}$$

$$X_2 = 1$$

— при виконанні нерівності:

$$(T_{cl} + (24^\circ\text{C} - T_{\text{nc}})) < T_{\text{бз}}$$

$$X_3 = 0$$

— при виконанні умови:

$$T_{\text{бз}} < T_{\text{кр}}$$

$$X_3 = 1$$

— при виконанні умови:

$$T_{\text{бз}} > T_{\text{кр}}$$

Досконала диз'юнктивна нормальна форма, що описує стан СБЗ:

$$F = (X_1 \cap X_2 \cap X_3) \cup (X_1 \cap \bar{X}_2 \cap \bar{X}_3) \cup (\bar{X}_1 \cap X_2 \cap \bar{X}_3) \cup (\bar{X}_1 \cap \bar{X}_2 \cap X_3) \quad (3.4)$$

Мінімізовані булеві функції

Нормальному режиму роботи відповідає функція:

$$F_{\text{н.р.}} = (X_1 \cap \bar{X}_2 \cap \bar{X}_3) = (1,0,0) \quad (3.5)$$

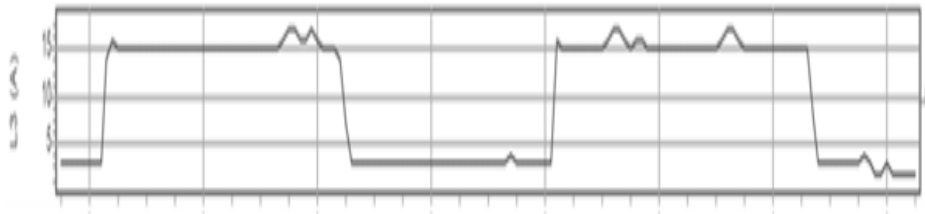
Початковому моменту ослаблення болтового з'єднання відповідає функція:

$$F_{\text{осл.бз}} = (X_1 \cap X_2 \cap \bar{X}_3) = (1,1,0) \quad (3.6)$$

Аварійному режиму відповідає функція:

$$F_{\text{ав.р}} = (X_1 \cap X_2 \cap X_3) = (1,1,1) \quad (3.7)$$

Характер зміни струмового навантаження обумовлений технологічним режимом роботи устаткування, а стаціонарний і детермінований характер зміни величини струму є частковим випадком нестационарного режиму.



Зміна величини струму дискретно, монотонно спадаюча або зростаюча, призводить до появи перехідного процесу нагрівання СБЗ, при якому температура змінюється за експоненційним законом.

$$X_4 = 0$$
$$\frac{dI_H}{dt} \neq 0$$

$$\frac{dI_H}{dt} = 0$$

27

— при виконанні умови:

$$\frac{dT_{\text{HC}}}{dt} \neq 0$$

$$X_5 = 1$$

— при виконанні умови:

$$\frac{dT_{\text{HC}}}{dt} = 0$$

$$X_6 = 0$$

— при виконанні умови:

$$\frac{dT_{\text{бз}}}{dt} \neq 0$$

$$X_6 = 1$$

— при виконанні умови:

$$\frac{dT_{\text{бз}}}{dt} = 0$$

Кількість булевих функцій від шести змінних:

$$2^{2^6} = 64536$$

Мінімізована диз'юнктивна булева функція для виявлення ослабленого режиму:

$$F_{\text{осл.бз}} = (X_1 \cap X_2 \cap \bar{X}_3) \sim (X_4 \cap X_5 \cap X_6) = (1,1,0,1,1,1) \quad (3.8)$$

Булева функція аварійного режиму:

$$F_{\text{ав.р}} = (X_1 \cap X_2 \cap X_3) \sim (X_4 \cap X_5 \cap X_6) = (1,1,1,1,1,1) \quad (3.9)$$

де $\sim$ — символ еквівалентності.

2.2 Дослідження функціональної моделі методу виявлення початкового моменту ослаблення болтового з'єднання при випадкових процесах зміни струму навантаження

Характер зміни струмового навантаження обумовлений не тільки технологічним режимом роботи устаткування, але й впливом випадкових факторів. Зміна напруги на шинах підстанції живлення має випадковий характер і залежить від добових, місячних і річних графіків навантаження мережі.

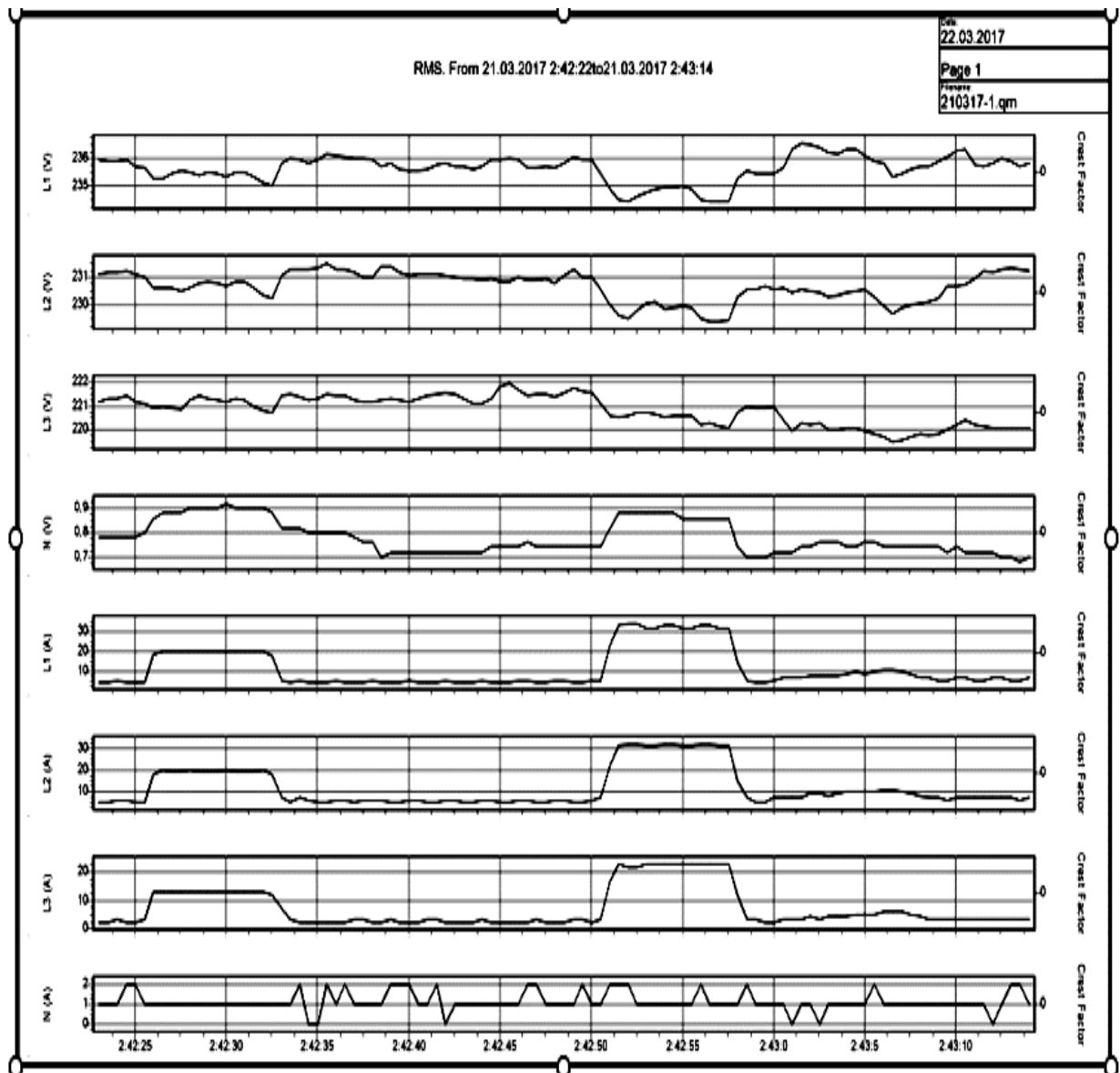


Рисунок 2.6 – Осцилограми струму навантаження РКТ і напруги на шинах КТП

На ділянках, де зміна величини струму не пов'язана з технологічним процесом, математичне очікування струму та напруги визначається за виразом:

$$M_I = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i$$

$$M_U = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i \quad (3.10)$$

Статична дисперсія:

$$D_I = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_i - M_I)^2$$

$$D_U = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (U_i - M_U)^2 \quad (3.11)$$

Середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma_I = \sqrt{D_I}$$

$$\sigma_U = \sqrt{D_U} \quad (3.12)$$

Для визначення ступеня залежності між струмом та напругою розраховується кореляційний момент:

$$k_{I,U} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_i - M_I)(U_i - M_U) \quad (3.13)$$

Таблиця 2.1 – Протокол вимірювань величин струму споживання РКТ і напруг на шинах КТП

№	I, А	U, В	№	I, А	U, В	№	I, А	U, В
1	7,1	23,6	1	6,8	23,1	2	7,3	24,1
2	7,2	23,0	1	7,4	24,0	2	7,4	24,1

3	6	23	1	7	23	2	7	23
,9	7,1	3	,3	9,0	3	,2	9,2	
4	6	23	1	6	23	2	6	23
,7	0,1	4	,5	0,1	4	,8	1,0	
5	7	24	1	6	22	2	6	23
,2	1,2	5	,4	7,0	5	,7	0,2	
6	7	24	1	6	23	2	6	22
,1	1,2	6	,8	0,1	6	,5	9,1	
7	7	24	1	7	24	2	7	23
,3	2,2	7	,2	0,1	7	,4	9,0	
8	6	23	1	7	24	2	6	23
,9	6,0	8	,3	0,0	8	,8	1,1	
9	7	23	1	7	23	2	6	23
,1	9,2	9	,3	5,1	9	,5	5,5	
1	7	22	2	7	23	3	6	23
0	,0	7,0	0	,1	6,1	0	,9	6,1

Результати статистичної обробки:

$$M_I = 7,01 \text{ A}$$

$$M_U = 235,86 \text{ B}$$

$$D_I = 0,1$$

$$\sigma_I = 0,32$$

$$D_U = 21,5$$

$$\sigma_U = 4,64$$

$$k_{I,U} = 2,07$$

При кореляційному моменті $k_{I,U} = 2,07$ існують підстави вважати, що струм і напруга пов'язані певною залежністю.

Розрахункова коригована температура справного СБЗ у сталому режимі визначається виразом:

$$T_{\text{кр}} = \frac{(\quad)^2}{\alpha F (R_{\text{бз}} + R_{\text{пр}})} + (24^\circ\text{C} + \Delta T) \quad (3.14)$$

де:

$$\Delta T = (M_{T_{\text{НС}}} + \sigma_{T_{\text{НС}}}) - 24^\circ\text{C}$$

Виміряна температура СБЗ:

$$T_{\text{бз}} = M_{T_{\text{бз}}} - \sigma_{T_{\text{бз}}} \quad (3.15)$$

Для побудови діагностичних тестів введемо булеві змінні:

$$X_4 = 0$$

— при виконанні умови:

$$M_{I,i} - M_{I,i+1} \neq 0$$

$$X_4 = 1$$

— при виконанні умови:

$$M_{I,i} - M_{I,i+1} = 0$$

$$X_5 = 0$$

— при виконанні умови:

$$M_{T_{\text{HC}},i} - M_{T_{\text{HC}},i+1} \neq 0$$

$$X_5 = 1$$

— при виконанні умови:

$$M_{T_{\text{HC}},i} - M_{T_{\text{HC}},i+1} = 0$$

$$X_6 = 0$$

— при виконанні умови:

$$M_{T_{\text{бз}},i} - M_{T_{\text{бз}},i+1} \neq 0$$

$$X_6 = 1$$

— при виконанні умови:

$$M_{T_{\text{бз}},i} - M_{T_{\text{бз}},i+1} = 0$$

Оціночні булеві функції:

$$F_{\text{осл.бз}} = (X_1 \cap X_2 \cap \bar{X}_3) \sim (X_4 \cap X_5 \cap X_6) = (1,1,0,1,1,1) \quad (3.16)$$

$$F_{\text{ав.р}} = (X_1 \cap X_2 \cap X_3) \sim (X_4 \cap X_5 \cap X_6) = (1,1,1,1,1,1) \quad (3.17)$$

2.3 Дослідження функціональної моделі методу контролю болтового з'єднання в перехідному режимі

Розвиток аварійної ситуації при ослабленні СБЗ може тривати від декількох днів до декількох місяців. Для багатьох автоматизованих виробництв

головним є завершення технологічного циклу та виведення обладнання з експлуатації у штатному режимі.

Розроблено метод діагностування та прогнозування стану СБЗ, новизна якого полягає у використанні зміни величини постійної нагріву СБЗ як інформаційного діагностичного параметра.

Умови застосування методу

- постійна нагріву є тепловою константою електрообладнання;
- аварійний стан не змінює величину струму навантаження.

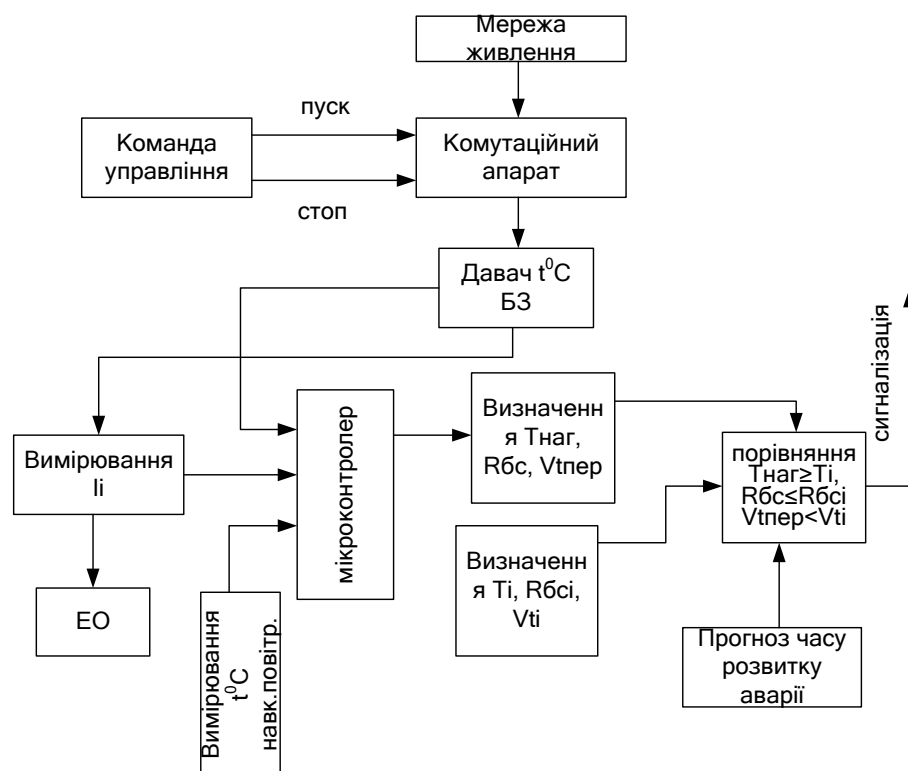


Рисунок 2.7 – Функціональна модель проходження сигналів способу контролю СБЗ і прогнозування часу розвитку аварійного процесу

Функціональна залежність параметрів:

$$\tau = f(t, R_c, I_H^2, \Delta T_{нс}) \quad (3.18)$$

Час досягнення СБЗ температури сталого режиму:

$$T = \tau \ln \frac{T_y - T_{нач}}{T_y - T} \quad (3.19)$$

Постійна нагріву:

$$\tau = \frac{cG\Delta T_y}{\Delta P} \quad (3.20)$$

$$\tau = \frac{cG\Delta T_y}{I^2 R_c} \quad (3.21)$$

де:

$$\Delta T = T_y - T_{\text{нач}}$$

$$R_c = R_k + R_{\text{пр}}$$

З урахуванням температури навколишнього середовища:

$$t = \frac{cG\Delta T_y}{I^2 R_c} \ln \frac{T_y - T_{\text{нач}} + \Delta T_{\text{нс}}}{T_y - T} \quad (3.22)$$

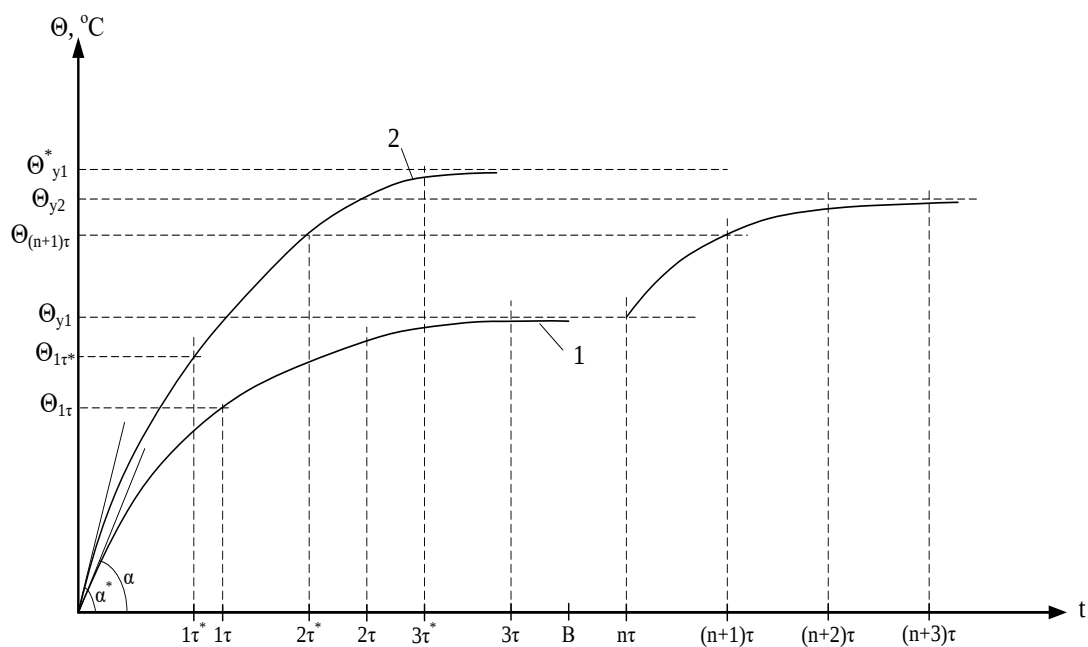


Рисунок 2.8 – Графік зміни температури струмоведучого СБЗ при цілісному та ослабленому станах

Швидкість нагріву СБЗ:

$$V = \frac{dT}{dt} \quad (3.23)$$

Швидкість нагріву за інтервал часу, рівний постійній нагріву:

$$V = \frac{T_0 - T_1}{\tau} \quad (3.24)$$

Постійну нагріву з похибкою до 5 % можна визначити:

$$\tau = \frac{T_{y1} - t_{\text{поч}}}{3} \quad (3.25)$$

Збільшення температури при перевищенні струму:

$$\Delta T_y^* = \Delta T_y k_{\Pi}^2 \quad (3.26)$$

де:

$$k_{\Pi} = \frac{I_{\text{нп}}}{I_{\text{н}}}$$

Швидкість нагріву при збільшенні сили струму:

$$V_{\Pi} = \frac{T_{(n+1)\tau} - T_{y1}}{\tau_{\Pi}} \quad (3.27)$$

Сумарний опір справного болтового з'єднання:

$$R_c = \frac{cG\Delta T_y}{I^2\tau} \quad (3.28)$$

Швидкість зміни температури ослабленого СБЗ:

$$V_t^* = \frac{T_{1\tau^*} - T_{\text{нач}}}{\tau^*} \quad (3.29)$$

Зміна постійної нагріву:

$$\tau^* = \tau k_v \quad (3.30)$$

де:

$$k_v = \frac{V}{V_t^*}$$

Час досягнення критичної температури:

$$t_{\text{доп}} = \tau \frac{\Delta T_{\text{доп}}}{\Delta T_y (k_p^2 - 1)} \quad (3.31)$$

2.3.1 Визначення меж довірчих інтервалів і зони чутливості вдосконаленого теплового методу контролю стану струмоведучого болтового з'єднання

Вимогами до методів технічної діагностики є достовірність виявлення дефектів, виключення помилкових спрацьовувань та забезпечення заданої чутливості.

Результати вимірювань і обчислень довірчих інтервалів для струмів наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 2.2 – Результати вимірювань та обчислень довірчих інтервалів для струмів

За результатами обчислень:

$$I = \frac{-4,73}{30} + 70 = 69,84 \text{ А}$$

$$S = 0,79$$

$$S_{\text{ср}} = 0,146$$

Величина струму знаходиться в інтервалі:

$$I = (69,87 \pm 0,15) \text{ A}$$

з імовірністю:

$$P = 0,955$$

Таблиця 2.3 – Результати вимірювань і обчислень довірчих інтервалів температури

За результатами обчислень:

$$T_{\text{cp}} = \frac{-2,5}{30} + 50 = 49,9^{\circ}\text{C}$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{29} \left(21,16 - \frac{(-2,5)^2}{30} \right)} = 2,67^{\circ}\text{C}$$

$$S_{\text{cp}} = \frac{2,67}{\sqrt{30}} = 0,52^{\circ}\text{C}$$

Температура болтового з'єднання знаходиться в інтервалі:

$$T_{\text{бз}} = (49,9 \pm 0,52)^{\circ}\text{C}$$

з імовірністю:

$$P = 0,955$$

Для межі вимірювань 120 °C клас точності приладу становить:

$$k = 0,5$$

Розрахункова температура СБЗ визначається непрямыми вимірами. Розрахункова величина похибки вимірювання струму для межі 100 А становить 0,15 %, тому:

$$\Delta T_{\text{розр.бз}} = \sqrt{(2\Delta I_{\text{нав}})^2} = 0,3\%$$

Похибка розрахункової температури:

$$T_{\text{розр.бз}} = (50 \pm 0,15)^\circ\text{C}$$

Виконується умова:

$$T_{\text{бз}} = (49,9 \pm 0,52)^\circ\text{C} > T_{\text{розр.бз}} = (50 \pm 0,15)^\circ\text{C}$$

що може призвести до неправильного визначення початкового моменту ослаблення та помилкового спрацювання засобів сигналізації.

Клас точності вимірювань сили струму повинен бути не нижче $k = 0,3$, а значення сили струму для розрахункової температури необхідно визначати з подвійною величиною похибки верхнього значення довірчого інтервалу.

Висновки до розділу 2

У розділі проведено дослідження математичних моделей динамічних режимів стану струмоведучих болтових з'єднань. Розглянуто методи визначення початкового моменту ослаблення СБЗ у стаціонарних, детермінованих та випадкових режимах струмового навантаження. Розроблено функціональні моделі контролю та прогнозування розвитку аварійних процесів, а також отримано аналітичні залежності для визначення температурних режимів і постійної нагріву СБЗ.

Проведені дослідження підтвердили можливість використання вдосконаленого теплового методу для оперативного моніторингу технічного

стану струмоведучих болтових з'єднань та прогнозування їх залишкового ресурсу експлуатації.

РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ СТРУМОВЕДУЧИХ БОЛТОВИХ З'ЄДНАНЬ

3.1. Опис експериментальної установки та методика проведення експерименту. Результати експериментальних досліджень та аналіз отриманих результатів

Для проведення експериментальних досліджень було використано цифровий мікроомметр LICA-105, який призначений для вимірювання малих значень електричного опору струмоведучих контактних з'єднань. Прилад дозволяє здійснювати високоточні вимірювання перехідного опору контактів, болтових та гвинтових з'єднань у колах низької напруги.

Використання мікроомметра дає можливість оперативно оцінювати технічний стан контактних з'єднань та виявляти потенційно небезпечні ділянки електричних мереж, де через збільшення контактного опору виникають локальні перегріву. Принцип роботи приладу ґрунтується на пропусканні через досліджуване коло стабілізованого струму та вимірюванні падіння напруги на контрольованій ділянці.

Основними	технічними	характеристиками	приладу	є:
—	діапазон	вимірювання	малих	опорів;
—	висока	точність		вимірювання;
—	автоматична	компенсація	похибок	контактів;
—	цифрове	відображення		результатів;
—	можливість	роботи	в польових	умовах.

Під час експерименту через контактне з'єднання пропускався струм величиною 30 А при напрузі живлення 230 В. Дослідження проводилися для трьох значень

перехідного опору: 180 мОм, 240 мОм та 340 мОм. Контроль температури здійснювався через певні проміжки часу з фіксацією отриманих результатів.

Методика проведення експерименту

Експериментальні дослідження виконувалися з метою визначення впливу перехідного опору на інтенсивність нагріву струмоведучих болтових з'єднань. Для кожного режиму було сформовано окрему серію вимірювань.

На початковому етапі дослідження виконувалася підготовка контактних поверхонь та перевірка правильності підключення вимірювального обладнання. Після цього через досліджуване контактне з'єднання подавався струм навантаження величиною 30 А. Вимірювання температури здійснювалися через визначені інтервали часу до моменту досягнення критичних температурних значень.

Особливу увагу було приділено стабільності режиму живлення та забезпеченню однакових умов проведення експерименту для всіх варіантів опору. Отримані результати використовувалися для побудови графічних залежностей та подальшого аналізу теплових процесів у контактних з'єднаннях.

У ході дослідження було встановлено, що збільшення перехідного опору призводить до інтенсифікації тепловиділення, що узгоджується із законом Джоуля–Ленца.

Результати експериментальних досліджень та аналіз отриманих результатів

Результати проведених вимірювань наведені у таблиці 3.1. На основі отриманих даних побудовано графіки залежності температури від часу та часу нагріву від величини перехідного опору.

Аналіз отриманих результатів показав, що контактні з'єднання з меншим значенням опору нагріваються швидше, однак при збільшенні опору процес

тепловиділення стає більш тривалим та нестабільним. Це пояснюється зміною площі фактичного контакту та погіршенням електричного контакту між поверхнями.

Динаміка нагріву має нелінійний характер, що свідчить про складність теплових процесів у контактних з'єднаннях. Отримані залежності можуть бути використані для прогнозування аварійних режимів роботи та розроблення систем діагностики стану електричних контактів.

Аналіз отриманих результатів

На основі проведених досліджень встановлено, що перехідний опір суттєво впливає на тепловий стан струмоведучих болтових з'єднань. При збільшенні опору спостерігається зростання часу досягнення критичних температурних значень, а також збільшення втрат електричної енергії.

Отримані графіки підтверджують наявність нелінійної залежності між параметрами нагріву та величиною перехідного опору. Найбільш інтенсивний нагрів спостерігався при опорі 180 мОм, де температура 40°C була досягнута за мінімальний проміжок часу.

Результати дослідження свідчать про необхідність регулярного контролю стану контактних з'єднань у системах електропостачання. Своєчасне виявлення підвищеного перехідного опору дозволяє запобігти аварійним режимам, локальним перегрівам та пошкодженню обладнання.

Практичне значення проведених досліджень полягає у можливості використання отриманих залежностей для створення автоматизованих систем моніторингу технічного стану контактних з'єднань у промислових електричних мережах та медичних лабораторіях.



Рисунок 3.1 – Мікроомметр LICA-105, використаний під час дослідження 3.1.1. Схема експериментального стенду та підключення вимірювального обладнання

На рисунку 3.1 наведено загальний вигляд експериментального стенду, який використовувався для дослідження теплового стану струмоведучих болтових з'єднань. До складу стенду входять лабораторна панель живлення, навантажувальні елементи, вимірювальні прилади контролю струму та напруги, а також цифровий мікроомметр LICA-105 для вимірювання перехідного опору контактних з'єднань.

Досліджуване болтове з'єднання було підключене до джерела живлення через струмові затискачі, що забезпечували проходження струму навантаження величиною до 30 А. Контроль параметрів режиму здійснювався за допомогою амперметра та вольтметра, розташованих на лабораторній панелі. Для вимірювання малих значень перехідного опору використовувався чотирипровідний метод підключення мікроомметра, який дозволяє мінімізувати

вплив опору з'єднувальних проводів на результати вимірювання.

Експериментальна установка дозволила моделювати режими нагріву контактних з'єднань при різних значеннях перехідного опору та здійснювати контроль зміни температурного стану в процесі тривалого струмового навантаження.

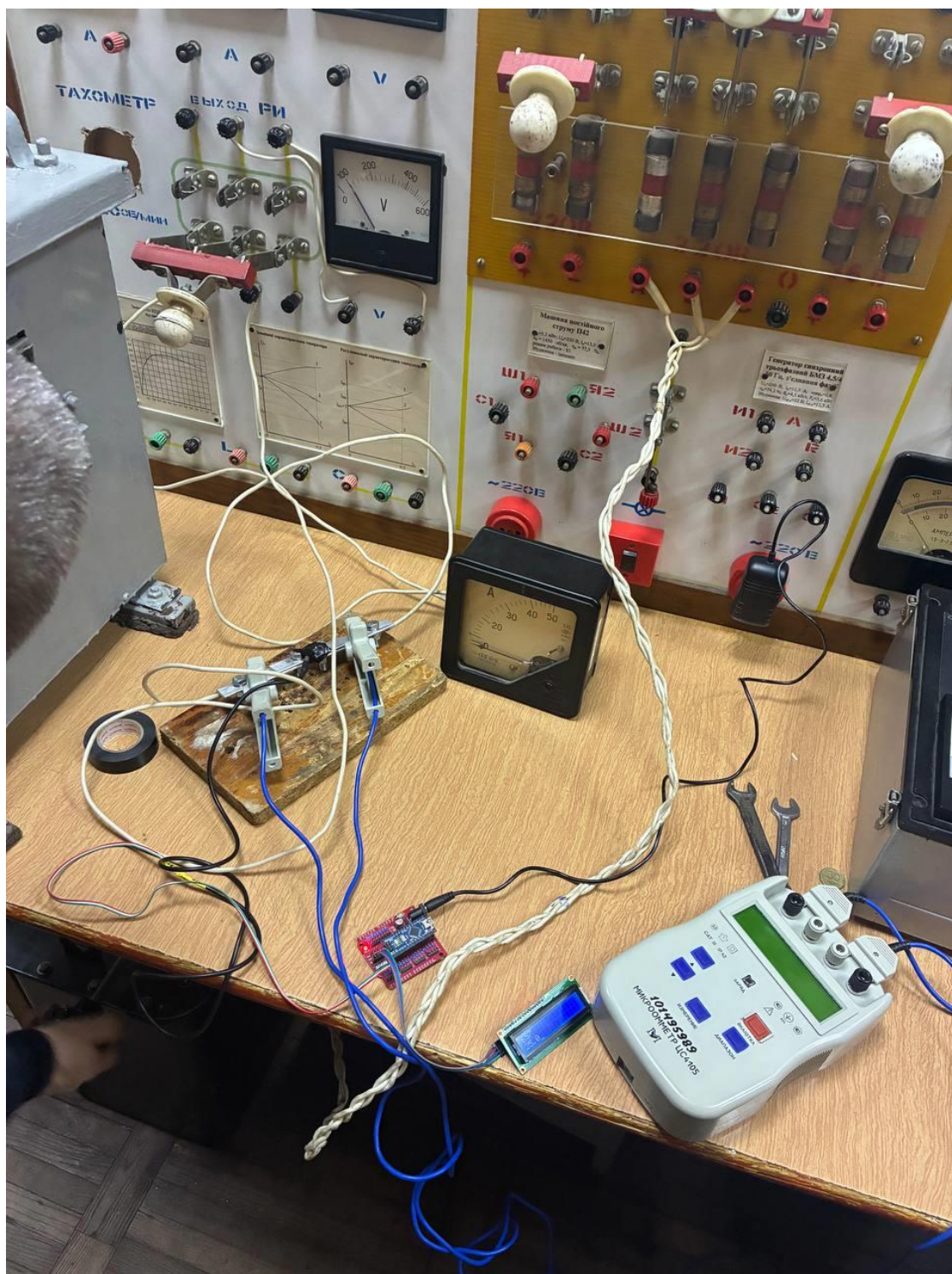


Рисунок 3.1.1 – Экспериментальный стенд для дослідження струмоведучих болтових з'єднань

Таблиця 3.1 – Результати експериментальних досліджень

Опір, мОм	Час досягнення 40°C, хв
340.0	5.1
240.0	3.9
180.0	3.5

Рисунок 3.2 – Динаміка нагріву контактного з'єднання

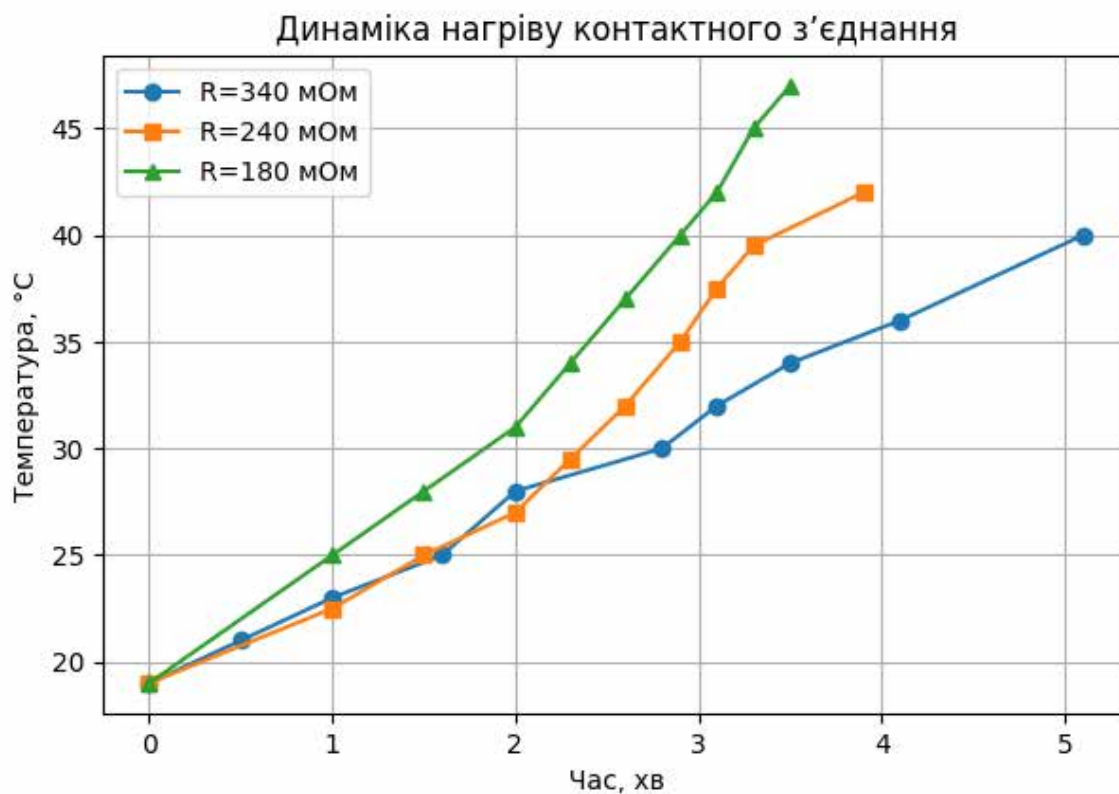
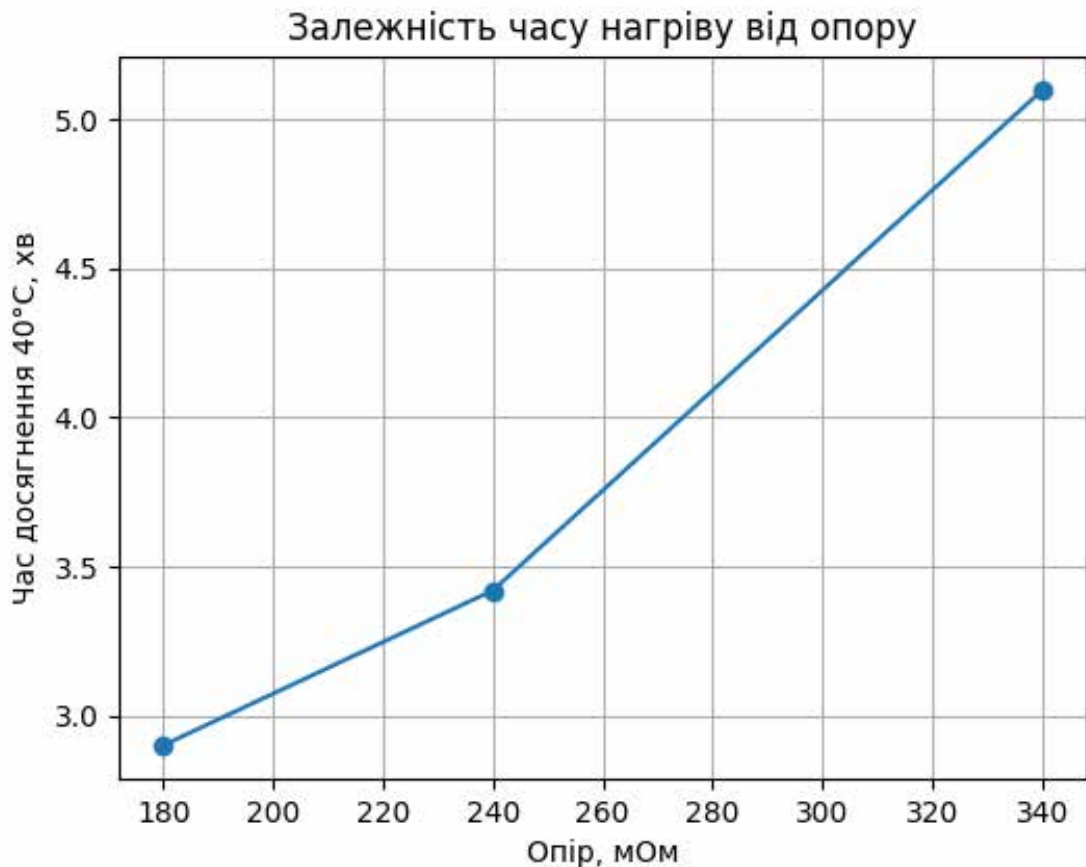


Рисунок 3.3 – Залежність часу нагріву від величини перехідного опору



Теплові втрати у контактному з'єднанні визначаються законом Джоуля–Ленца:

$$Q = I^2 R t$$

3.2. РОЗРОБКА ПРИСТРОЇВ ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДІАГНОСТИКИ СТАНУ СТРУМОВЕДУЧИХ БОЛТОВИХ З'ЄДНАНЬ І КОНТРОЛЮ ЦІЛІСНОСТІ СТРУМОВИХ КІЛ

Загальні положення та актуальність розробки пристроїв контролю СБЗ

Робота електрообладнання в умовах неповнофазного режиму є аварійним явищем. Причинами неповнофазних режимів, крім неповнофазного режиму мережі живлення, є обриви струмоведучих ліній, болтових з'єднань, недовключення одного з полюсів у комутаційному апараті. Своєчасне виявлення неповнофазного режиму і моменту виникнення передаварійної ситуації є актуальним завданням.

Для реалізації методів виявлення початкового моменту ослаблення струмоведучих болтових з'єднань (СБЗ) розроблені пристрої які мають схемотехнічні, конструктивні та програмні відмінності, що дозволяє класифікувати їх таким чином:

1. Пристрої, що діагностують стан віддалених струмоведучих болтових з'єднань, наприклад високовольтних ліній електропостачання, шин підстанцій, а також з'єднань, що знаходяться у закритих важкодоступних місцях.
2. Пристрої, що діагностують стан СБЗ, які одержують електропостачання від системи змінної трифазної напруги.
3. Комбіновані пристрої, що діагностують стан болтових з'єднань і контролюють цілісність струмових кіл.

Для важкодоступних СБЗ, наприклад високовольтних ліній електропостачання та СБЗ, встановлених у щитах, на рисунку 5.9 представлена блок-схема пристрою контролю СБЗ, в якій для живлення блоків використаний трансформатор струму, а передача отриманої інформації про стан струмового навантаження, температурні показники СБЗ і навколишнього повітря здійснюється за допомогою приймача сигналів з використанням GSM-GPRS каналів зв'язку.

Новизною розроблених приладів є діагностика стану болтових з'єднань електроустаткування, що працює зі змінними навантаженням та температурою навколишнього середовища, при якій визначається початок зростання перехідного опору БЗ, що дозволяє своєчасно виявити початковий момент розвитку аварійної ситуації.

Пристрій контролю та діагностики стану болтових з'єднань електроустаткування містить:

- цифровий блок контролю температури болтового з'єднання;
- прийомопередавач;

- блок живлення;
- цифровий блок вимірювання температури навколишнього середовища;
- блок вимірювання сили струму навантаження з перетворенням у цифровий сигнал;
- мікроконтролер.

Виходи зазначених блоків з'єднані з входами мікроконтролера, який поєднаний із прийомопередавачем. Крім того, вихід блока живлення з'єднаний із входами блока вимірювання температури навколишнього середовища, блока вимірювання сили струму та мікроконтролера.

Рисунок 3.4 – Блок-схема пристрою контролю стану віддаленого болтового струмоведучого з'єднання, що важко обслуговується.

Принцип роботи пристрою контролю віддалених струмоведучих болтових з'єднань

Нормальний режим роботи болтового з'єднання

При температурі навколишнього середовища 24 °С струм, що протікає по струмоведучому ланцюгу та СБЗ, призводить до появи живлення на виході блока живлення. Усі блоки отримують живлення та активізуються. На виходах блоків вимірювання температур з'являються сигнали, що відповідають:

- величині струмового навантаження;
- температурі навколишнього середовища;
- температурі болтового з'єднання.

Сигнали:

- $U_{т.н}$ – відповідають рівню струму в шинопроводі;
- $U_{т.к}$ – відповідають температурі болтового з'єднання;
- $U_{оср}$ – температурі навколишнього середовища.

Якщо виконується нерівність:

$\square \text{genui} \square \{ "math_block_widget_always_prefetch_v2": \{ "content": "U_{т.н} > U_{т.к}" \} \} \square$

при цьому:

$\square \text{genui} \square \{ "math_block_widget_always_prefetch_v2": \{ "content": "U_{оср} = 0" \} \} \square$

що відповідає температурі 24 °С, то це означає нормальний режим роботи болтового з'єднання.

Наступні зміни струму навантаження призводять до відповідної зміни сигналів $U_{т.н}$ і $U_{т.к}$ на величину, пропорційну зміні струму навантаження. Величини сигналів визначаються як:

$\square \text{genui} \square \{ "math_block_widget_always_prefetch_v2": \{ "content": "U_{т.н} \pm \Delta U_{т.н}(I_{н})" \} \} \square$

та

$\square \text{genui} \square \{ "math_block_widget_always_prefetch_v2": \{ "content": "U_{т.к} \pm \Delta U_{т.к}(I_{н})" \} \} \square$

За таких умов нерівність:

$\square \text{genui} \square \{ "math_block_widget_always_prefetch_v2": \{ "content": "U_{т.н} \pm \Delta U_{т.н}(I_{н}) > U_{т.к} \pm \Delta U_{т.к}(I_{н})" \} \} \square$

зберігається незалежно від часу теплового перехідного режиму.

Якщо при незмінному навантаженні відбулася зміна температури навколишнього середовища на величину:

$\square \text{genui} \square \{ "math_block_widget_always_prefetch_v2": \{ "content": "\mp \Delta t^{\circ}_{н.с}" \} \} \square$

то сигнал блока 3 пропорційно змінить свою величину на:

$\square \text{genui} \square \{ "math_block_widget_always_prefetch_v2": \{ "content": "0 \pm \Delta t^{\circ} C" \} \} \square$

Величини сигналів визначаються як:

$$\square \text{genui} \square \{ "math_block_widget_always_prefetch_v2": \{ "content": "U_{\text{т.н}} \backslash \text{pm} \backslash \Delta U_{\text{т.н}} (\Delta t^{\{\text{circ}\}}_{\text{н.с}}) " \} \} \square$$

та

$$\square \text{genui} \square \{ "math_block_widget_always_prefetch_v2": \{ "content": "U_{\text{т.к}} \backslash \text{pm} \backslash \Delta U_{\text{т.к}} (\Delta t^{\{\text{circ}\}}_{\text{о.с}}) " \} \} \square$$

При цьому знову виконується умова:

$$\square \text{genui} \square \{ "math_block_widget_always_prefetch_v2": \{ "content": "U_{\text{т.н}} \backslash \text{pm} \backslash \Delta U_{\text{т.н}} (\Delta t^{\{\text{circ}\}}_{\text{о.с}}) > U_{\text{т.к}} \backslash \text{pm} \backslash \Delta U_{\text{т.к}} (\Delta t^{\{\text{circ}\}}_{\text{о.с}}) " \} \} \square$$

Режим зміни струму навантаження та температури навколишнього середовища призводить до відповідних змін сигналів. Значення сигналів визначаються так:

для струмового сигналу:

$$\square \text{genui} \square \{ "math_block_widget_always_prefetch_v2": \{ "content": "U_{\text{т.н}} \backslash \text{pm} \backslash \Delta U_{\text{т.н}} (\Delta t^{\{\text{circ}\}}_{\text{н.с}}) \backslash \text{pm} \backslash \Delta U_{\text{т.н}} (I_{\text{н}}) " \} \} \square$$

для температурного сигналу болтового з'єднання:

$$\square \text{genui} \square \{ "math_block_widget_always_prefetch_v2": \{ "content": "U_{\text{т.к}} \backslash \text{pm} \backslash \Delta U_{\text{т.к}} (\Delta t^{\{\text{circ}\}}_{\text{н.с}}) \backslash \text{pm} \backslash \Delta U_{\text{т.к}} (I_{\text{н}}) " \} \} \square$$

За таких умов знову виконується нерівність:

$$\square \text{genui} \square \{ "math_block_widget_always_prefetch_v2": \{ "content": "U_{\text{т.н}} \backslash \text{pm} \backslash \Delta U_{\text{т.н}} (\Delta t^{\{\text{circ}\}}_{\text{н.с}}) \backslash \text{pm} \backslash \Delta U_{\text{т.н}} (I_{\text{н}}) > U_{\text{т.к}} \backslash \text{pm} \backslash \Delta U_{\text{т.к}} (\Delta t^{\{\text{circ}\}}_{\text{н.с}}) \backslash \text{pm} \backslash \Delta U_{\text{т.к}} (I_{\text{н}}) " \} \} \square$$

Режим початку аварійної ситуації

Порушення щільності болтового з'єднання призводить до збільшення його перехідного опору. Настає момент, коли виконується нерівність:

$$\square \text{genui} \square \{ "math_block_widget_always_prefetch_v2": \{ "content": "U_{\text{т.н}} \backslash \text{pm} \backslash \Delta U_{\text{т.н}} (\Delta t^{\{\text{circ}\}}_{\text{н.с}}) \backslash \text{pm} \backslash \Delta U_{\text{т.н}} (I_{\text{н}}) < U_{\text{т.к}} \backslash \text{pm} \backslash \Delta U_{\text{т.к}} (\Delta t^{\{\text{circ}\}}_{\text{н.с}}) \backslash \text{pm} \backslash \Delta U_{\text{т.к}} (I_{\text{н}}) + \Delta U_{\text{т.к}} (R_{\text{пер}}) " \} \} \square$$

Виконання даної нерівності означає початок ослаблення болтового з'єднання та розвиток аварійної ситуації.

Рисунок 3.5 – Алгоритм роботи мікроконтролера пристрою контролю та діагностики стану віддаленого СБЗ, що важко обслуговується.

Де:

- $t_{бза}, t_{бзв}, t_{бзс}$ – температури відповідних фаз болтових з'єднань;
- $t_{нс}$ – температура навколишнього повітря;
- $t_{доп}$ – допустима температура СБЗ;
- $t_{бзmax}$ – найбільша температура СБЗ;
- $t_{р.рт}$ – розрахункова температура СБЗ при протіканні струму навантаження;
- $t_{кр}$ – критична температура СБЗ;
- K_p – розрахунковий коефіцієнт переведення величини струмового навантаження в еквівалентну температуру СБЗ;
- Δt – крок дискретизації опитування температурних і струмових датчиків.

Пристрій контролю стану болтових струмоведучих з'єднань і струмоведучих ліній трифазної напруги

Поряд з ослабленням болтового з'єднання, обрив кола струму чи неповнофазний режим мережі живлення є аварійним режимом.

Для удосконалення пристрою діагностування ослаблення болтових струмоведучих з'єднань і обриву струмоведучих частин системи електропостачання електроприймача було розроблено пристрій, в якому за рахунок введення нових блоків і їх взаємозв'язків досягається можливість:

- виявлення початкового моменту ослаблення одного з болтових з'єднань;

- контролю появи неповнофазного режиму живлення електроустаткування;
- виявлення обриву струмоведучих ліній;
- захисту електрообладнання від роботи при неповнофазному режимі.

Структура та склад пристрою

Пристрій містить:

- комутаційний апарат;
- датчики температури болтових з'єднань;
- блоки вимірювання температури болтових з'єднань;
- блок вимірювання сили фазних струмів;
- блок управління і сигналізації;
- блок цифро-аналогового перетворення сигналів;
- мікроконтролер;
- блок живлення.

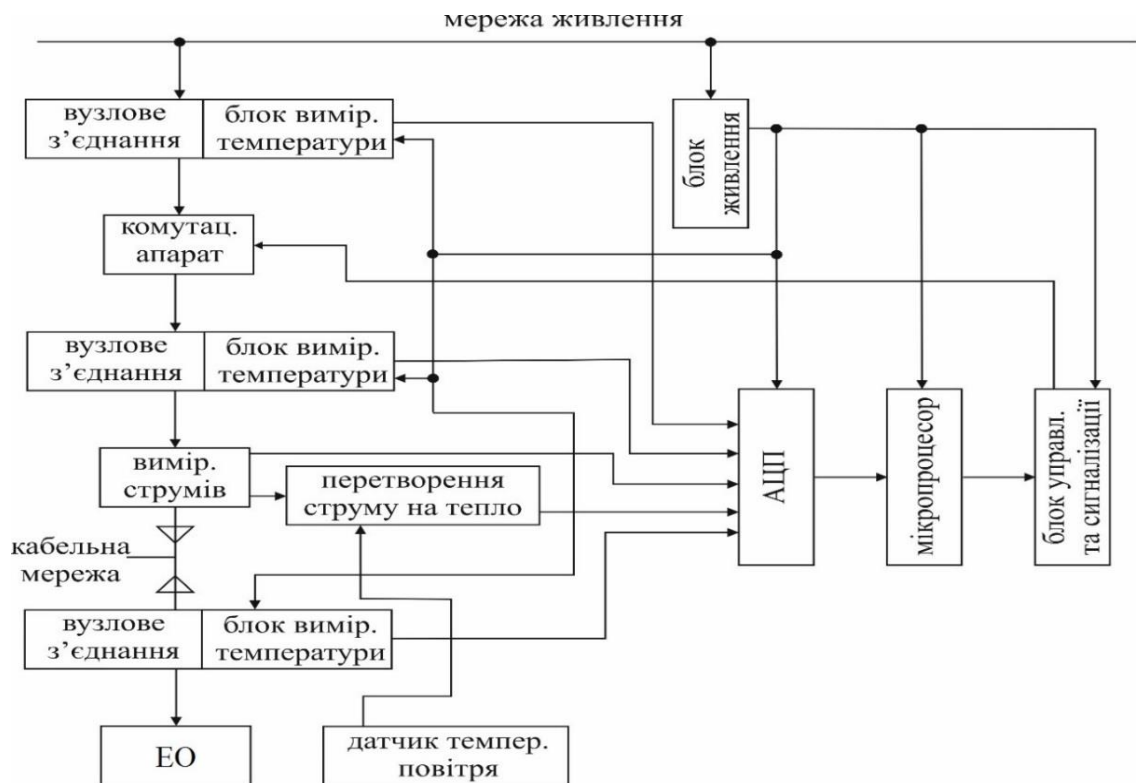


Рисунок 3.6 – Блок-схема пристрою контролю стану болтових струмоведучих з'єднань і струмоведучих ліній трифазної напруги.

Вузли болтових з'єднань з датчиками температури являють собою три болтових з'єднання у вузлі кожної фази. Вузли є місцями кріплення трьох фаз комутаційного апарату з живильною і кабельною мережами, а також трьох фаз кабельної мережі з електроприймачем.

Як температурний датчик використовується жорстко закріплений до кожного болтового з'єднання терморезистор дискового типу СТ10-1Д з діапазоном зміни температур від -60 до $+185$ °C та номінальним значенням 300 кОм.

Блок вимірювання температури болтового з'єднання виконаний у вигляді мостової схеми опорів, однією гілкою якої є терморезистор, розташований на кожному болтовому з'єднанні. Інші гілки виконані високоомними опорами типу С2-29М номіналом 300 кОм.

На одну діагональ мостової схеми подається живлення з блока живлення, а з другої діагоналі отримують сигнал у вигляді напруги, еквівалентної температурі кожного болтового з'єднання.

Комутаційний апарат виконаний на базі електромагнітного пускача з операційними ланцюгами управління.

Блок вимірювання сили фазних струмів реалізований на трансформаторах струму. Сердечник трансформатора струму виконаний із швидконасихуваної сталі, а вторинна обмотка намотана емальованим дротом, що дозволяє контролювати зміну струму навантаження в межах від 0,1 до 1,05 Ін.

У вторинному колі трансформаторів струму встановлені шунтові дільники напруги зі співвідношенням опорів 1/5. Напруга на одному з плечей дільника змінюється від 0 до 2,5 В при зміні струму навантаження від 0 до 1,05 Ін.

Блок перетворення струмового сигналу в розрахунковий температурний сигнал та корекції цього сигналу залежно від температури навколишнього середовища використовує напругу другого плеча шунтового дільника.

Блок вимірювання температури навколишнього середовища виконаний на базі терморезистора бусинкового типу СТ6-1.

Блок цифро-аналогового перетворення сигналів реалізований на мікросхемі АЦП типу AD7091R.

Мікроконтролер виконаний на базі мікроконтролера ATmega88 фірми Atmel.

Блок управління і сигналізації реалізований у вигляді кнопок «Пуск» і «Стоп», проміжних реле та контактів управління комутаційним апаратом і засобами сигналізації.

Блок живлення утворений трьома однофазними трансформаторами напруги, підключеними до лінійних напруг живильної мережі.

Принцип роботи пристрою

При натисканні кнопки «Пуск» комутаційний апарат підключає електроспоживач до мережі живлення. Протікання струму у струмоведучих болтових з'єднаннях призводить до їх нагрівання.

Значення температури нагріву болтового з'єднання визначається:

- величиною сили струму;

- температурою навколишнього середовища;
- величиною перехідного опору болтового з'єднання.

Несиметрія струмів, викликана несиметрією напруг мережі живлення, призводить до різних значень температур болтових з'єднань.

Блоки вимірювання температури болтового з'єднання визначають температурні значення кожного болтового з'єднання. Отримані сигнали надходять на вхід блока цифро-аналогового перетворення, а після перетворення – на входи мікроконтролера.

Блок вимірювання сили фазних струмів вимірює величини фазних струмів, які після аналого-цифрового перетворення надходять до мікроконтролера.

Відсутність одного зі струмових сигналів визначає неповнофазний аварійний режим, причиною якого є:

- обрив однієї з фаз струмових ланцюгів;
- поява неповнофазного режиму в мережі живлення.

У цьому випадку електроспоживач відключається від мережі живлення.

Контроль наявності трьох фазних струмів здійснюється безперервно протягом усього часу роботи електроспоживача.

Нормальний режим роботи пристрою

При температурі навколишнього середовища 24 °С струм, що протікає у струмових лініях та вузлах болтових з'єднань, призводить до нагрівання болтових з'єднань.

На виходах блоків вимірювання температури болтового з'єднання з'являються сигнали $U_{т.бз}$, які відповідають температурі болтового з'єднання.

На виході блока перетворення струмового сигналу також формується сигнал $U_{т.н}$.

Мікроконтролер перевіряє виконання умови:

$\square \text{genui} \square \{ \text{"math_block_widget_always_prefetch_v2"}: \{ \text{"content"}: "U_{т.н} > U_{т.бз} \} \} \square$

яка відповідає справному болтовому з'єднанню.

Наступні зміни струму навантаження приводять до зміни сигналів:

$$\square_{\text{genui}} \square \{ "math_block_widget_always_prefetch_v2": \{ "content": "U_{\text{т.н}} \pm \Delta U_{\text{т.н}}(I_{\text{н}})" \} \} \square$$

та

$$\square_{\text{genui}} \square \{ "math_block_widget_always_prefetch_v2": \{ "content": "U_{\text{т.бз}} \pm \Delta U_{\text{т.бз}}(I_{\text{н}})" \} \} \square$$

При цьому зберігається умова:

$$\square_{\text{genui}} \square \{ "math_block_widget_always_prefetch_v2": \{ "content": "U_{\text{т.н}} \pm \Delta U_{\text{т.н}}(I_{\text{н}}) > U_{\text{т.бз}} \pm \Delta U_{\text{т.бз}}(I_{\text{н}})" \} \} \square$$

Режим початку ослаблення болтового з'єднання

За умови незмінних значень струму та температури навколишнього середовища ослаблення одного з болтових з'єднань призводить до збільшення його перехідного опору.

Величина виділеного тепла визначається законом Джоуля–Ленца:

$$\square_{\text{genui}} \square \{ "math_block_widget_always_prefetch_v2": \{ "content": "Q = I^2 R t" \} \} \square$$

Зростання температури аварійного болтового з'єднання відбувається за рахунок збільшення перехідного опору.

Настає момент, коли виконується умова:

$$\square_{\text{genui}} \square \{ "math_block_widget_always_prefetch_v2": \{ "content": "U_{\text{т.н}} \pm \Delta U_{\text{т.н}}(\Delta t^{\text{circ}}_{\text{н.с}}) \pm \Delta U_{\text{т.н}}(I_{\text{н}}) < U_{\text{т.бз}} \pm \Delta U_{\text{т.бз}}(\Delta t^{\text{circ}}_{\text{н.с}}) \pm \Delta U_{\text{т.бз}}(I_{\text{н}}) + \Delta U_{\text{т.бз}}(R_{\text{пер}})" \} \} \square$$

Блок управління і сигналізації формує сигнал про початок ослаблення болтового з'єднання та розвиток аварійної ситуації.

При досягненні температури ослабленого болтового з'єднання величини 120 °С на виході мікроконтролера з'являється сигнал, який надходить на блок

управління і сигналізації. Електроспоживач відключається від мережі живлення, а також вмикається аварійна сигналізація.

Експериментальна перевірка роботи пристрою

Перевірка роботи пристрою здійснювалася в лабораторних умовах. Як джерело електроенергії використано генератор змінного струму ПСМ АТ-50, що дозволяє:

- отримувати трифазну напругу 0,4 кВ;
- змінювати струм від 10 до 100 А.

Регулювання струму здійснювалося за допомогою рухомого реостатного навантаження.

Для вимірювання струму навантаження використані трансформатори струму ТТ 100/5 напругою 0,4 кВ.

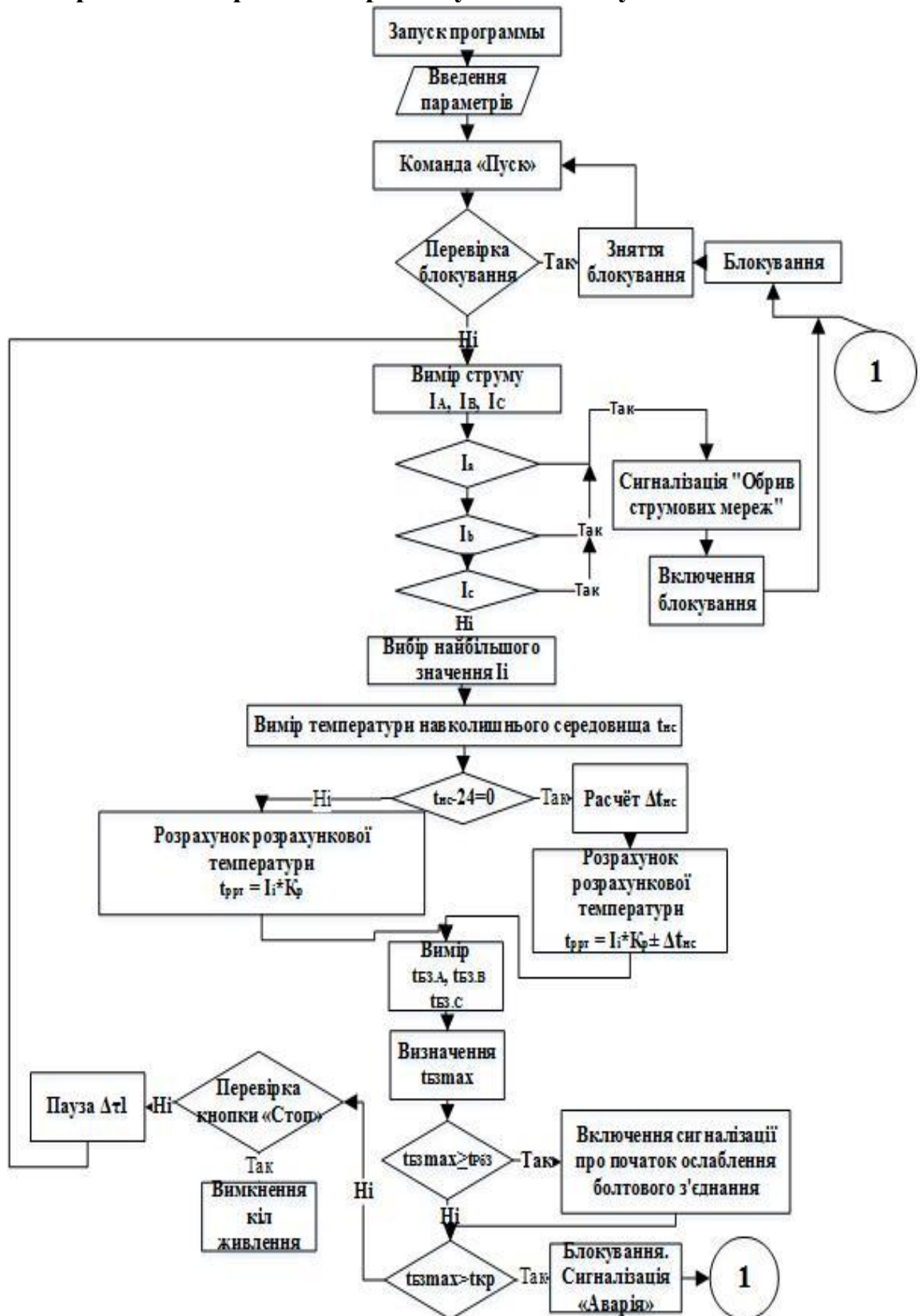
Зміну температури навколишнього середовища здійснювали за допомогою теплового фена. Тепловий потік одночасно впливав на термодатчики блоків.

Зміну температури болтового з'єднання при незмінному навантаженні здійснювали шляхом ослаблення болтового з'єднання при різних значеннях відносної величини перехідних опорів.

У результаті перевірки встановлено:

1. Вимкнення одного з фазних струмів призводило до відключення електроспоживача від мережі живлення та включення сигналізації.
2. Досягнення температури 100 °С несправного болтового з'єднання призводило до спрацьовування блока управління і сигналізації та включення сигналізації про початок ослаблення болтового з'єднання.

Алгоритми контролю та прогнозування стану СБЗ



На рисунку 3.7 представлено алгоритм контролю стану СБЗ та обриву струмоведучих ліній.

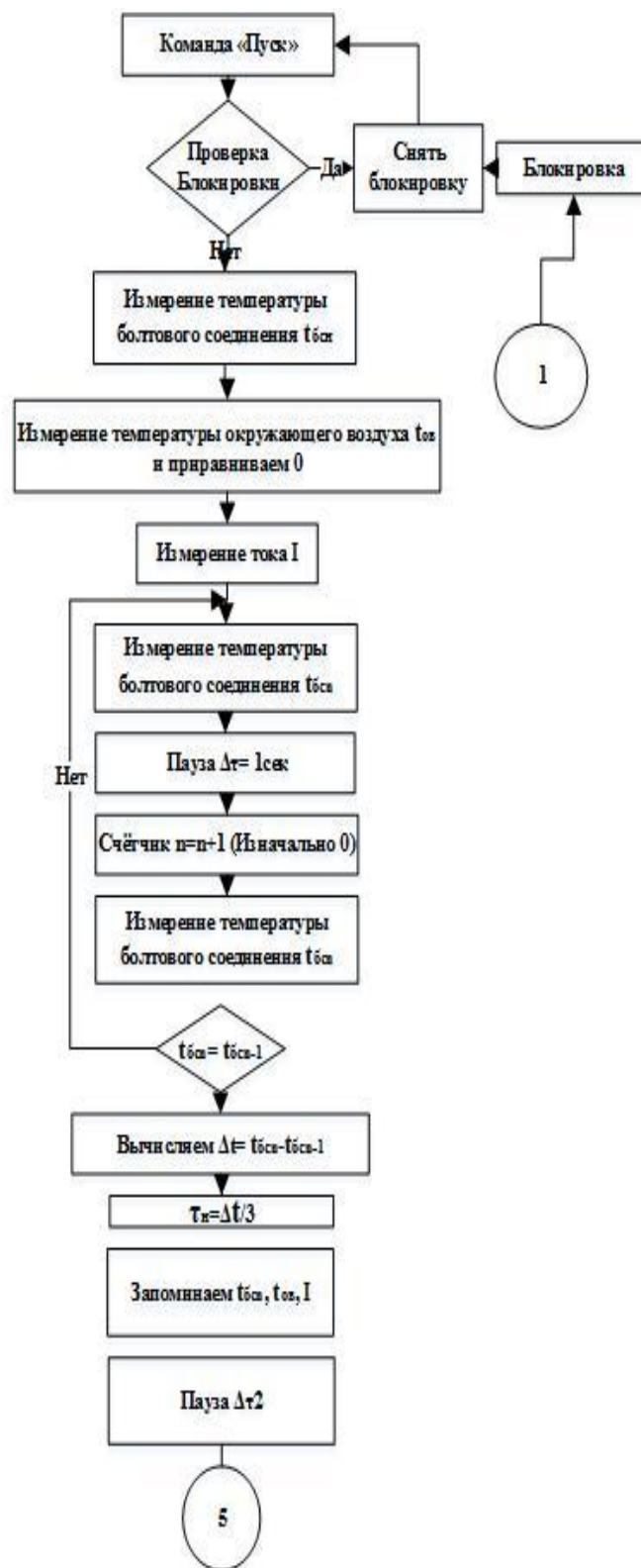
Рисунок 3.8 – Алгоритм прогнозування часу розвитку аварії при ослабленні болтового з'єднання.

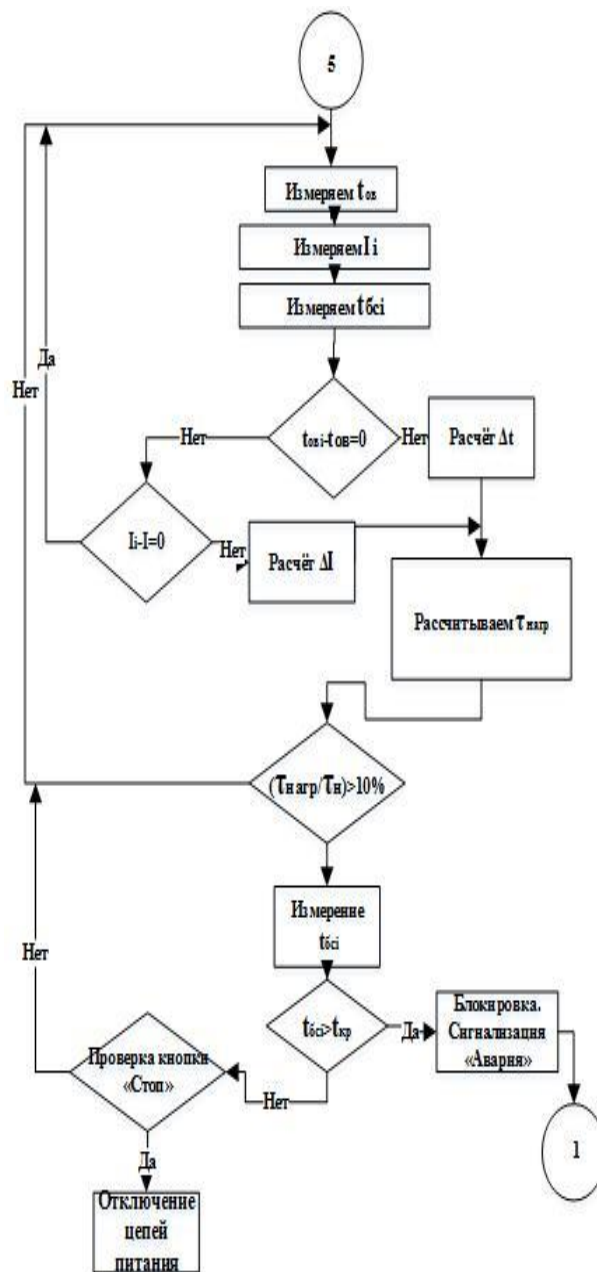
Де:

- t_{BC} – температура СБЗ;
- t_{ov} – температура навколишнього повітря;
- $t_{кр}$ – допустима критична температура СБЗ;
- K_p – розрахунковий коефіцієнт переведення величини струмового навантаження в еквівалентну температуру СБЗ;
- $\Delta\tau$ – крок дискретизації опитування температурного датчика СБЗ;
- $t_{нагр}$ – експериментально отримана постійна нагріву справного СБЗ;
- t_n – розрахункова постійна нагріву при зміні параметрів температури навколишнього повітря і струмового навантаження.

Програмне забезпечення діагностики стану болтових з'єднань та контролю цілісності струмових ланцюгів

Наведено протокол і лістинг роботи комп'ютерної програми «Діагностика стану болтових з'єднань та контролю цілісності струмових ланок».





На рисунку Д.7.1 наведена логічна схема проходження інформаційних сигналів, сигналів вимірювання контрольованих величин та командних управляючих сигналів.

Позначення на рисунку Д.7.1:

- 1 – блок трансформаторів струму;
- 2 – електрообладнання;
- 3 – блок вимірювання температури навколишнього середовища;

- 4 – болтові струмоведучі з'єднання;
- Q1 – пускач (вимикач) для включення і виключення електрообладнання.

На рисунку Д.7.2 наведено протокол введення даних, які можуть бути змінені в програмі «Меню».

```
Меню:
0 – Ввод парраметров.
1 – Запуск работы.
Выбор:
```

```
Меню:
0 – Ввод параметров.
1 – Запуск работы.
Выбор:
0
Меню изменения параметров:
0 – Изменение Rбс.
1 – Изменение А1.
2 – Изменение F.
3 – Изменение Паузы.
4 – Изменение tkr.
5 – Назад.
Выбор:
4
Ввод значения tkr:
120
```

Рисунок Д.7.2 – Протокол введення даних комп'ютерної програми «Діагностика стану СБЗ і контролю цілісності струмових ланцюгів».

Керуючими командами є:

- команда «Пуск» – підключення електрообладнання до мережі живлення;
- команда «Стоп» – відключення від мережі живлення;
- команда «Зняття блокування» – зняття обмеження після аварійної зупинки електрообладнання.

Керуючим сигналом є сигнал на управління пускачем Q1.

Вимірювальними сигналами є:

- температури КЗ: $t_{бза}$, $t_{бзв}$, $t_{бзс}$;
- температура навколишнього середовища $t_{нс}$;
- величини фазних струмів I_a , I_b , I_c .

```
Проверка Блокировки!  
Блокировка отключена. Продолжение работы.  
Измерение тока!  
Ia: 5  
Ib: 9  
Ic: 0  
Включение сигнализации <Обрыв токовых сетей>.  
Включение блокировки!  
Проверка Блокировки!  
Включена блокировка. Снять блокировку? (0-да 1-нет): 0  
  
Измерение тока!  
Ia: 2  
Ib: 4  
Ic: 8  
  
Максимальный ток: 8  
  
Температура окружающей среды: 0  
  
Расчётная температура: 0.164103  
Измерение температуры:  
ta: 4  
tb: 160  
tc: -2  
  
Максимальная температура: 160  
  
Включение сигнализации о начале ослабления болтового соединения.  
  
Включение блокировки!  
Включение сигнализации <Авария>  
Проверка Блокировки!  
Включена блокировка. Снять блокировку? (0-да 1-нет): 0  
  
Измерение тока!  
Ia: 2  
Ib: 4  
Ic: 8  
  
Максимальный ток: 8  
  
Температура окружающей среды: 8  
  
Расчётная температура: 0.164103  
Измерение температуры:  
ta: 2  
tb: 4  
tc: 0  
  
Максимальная температура: 4  
  
Включение сигнализации о начале ослабления болтового соединения.  
Проверка нажатия на кнопку СТОП!
```

На рисунку Д.7.3 наведено протокол роботи комп'ютерної програми.

Рисунок Д.7.3 – Протокол роботи комп'ютерної програми «Діагностика стану болтових з'єднань і контролю цілісності струмових ланцюгів».

3.10.1. Лістинг комп'ютерної програми

```
#include <iostream>
using namespace std;
void Menu();
void Start();
bool Check(bool &checkObj);
double r(0.001), al(390.0), f(0.001), pause(5.0), tkr(120);
int main()
{setlocale(LC_ALL, "");
int a;
do
{ system("cls");
cout << "Меню:" << endl;
cout << "0 - Ввод параметрів." << endl;
cout << "1 - Запуск работи." << endl;
cout << "Вибір:" << endl;
cin >> a;
switch (a)
{case 0:
{Menu();
break; }
case 1:
{Start();
break; }}}
while (true);
system("pause");
```

```

return 0;}

void Menu()
{int a;
do
{system("cls");
cout << "Меню зміни параметрів:" << endl;
cout << "0 - зміна Rбс." << endl;
cout << "1 - зміна Al." << endl;
cout << "2 - зміна F." << endl;
cout << "3 - зміна Паузы." << endl;
cout << "4 - зміна tkr." << endl;
cout << "5 - Назад." << endl;
cout << "Вибір:" << endl;
cin >> a;
switch (a)
{case 0:
{cout << "Ввод значень Rбс:" << endl;
cin >> r;
break; }
case 1:
{cout << "Ввод значень Al:" << endl;
cin >> al;
break; }
case 2:
{cout << "Ввод значень F:" << endl;
cin >> f;
break; }
case 3:
{cout << "Ввод значень Паузы:" << endl;

```

```

cin >> pause;
break; }
case 4:
{cout << "Ввод значенб tkr:" << endl;
cin >> tkr;
break; }
case 5:
{return;
break; }}}
while (a != 4);}

```

Висновки до розділу

Розглянуто розробку пристроїв та програмного забезпечення для діагностики стану струмоведучих болтових з'єднань і контролю цілісності струмових кіл. Запропоновані технічні рішення дозволяють:

- здійснювати безперервний контроль температурного стану СБЗ;
- виявляти початковий момент ослаблення болтового з'єднання;
- контролювати цілісність струмових кіл;
- виявляти неповнофазні режими роботи;
- здійснювати аварійне відключення електрообладнання;
- прогнозувати розвиток аварійної ситуації.

Результати експериментальних досліджень підтвердили працездатність та ефективність розроблених пристроїв і алгоритмів діагностування.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі проведено експериментальне дослідження стану струмоведучих болтових з'єднань, виконано аналіз отриманих результатів та розглянуто приклад практичної реалізації пристроїв і програмних засобів діагностики їх технічного стану. Отримані результати підтверджують можливість своєчасного виявлення передаварійних режимів, прогнозування розвитку перегріву та підвищення надійності систем електропостачання.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі виконано комплексне дослідження теплових характеристик болтових струмоведучих з'єднань електротехнічних комплексів, що є важливим напрямом підвищення надійності, безпеки та ефективності експлуатації електроенергетичного обладнання. Актуальність проведеного дослідження обумовлена тим, що струмоведучі контактні болтові з'єднання є одними з найбільш вразливих елементів систем електропостачання, а їх технічний стан безпосередньо впливає на безперебійну роботу електрообладнання, пожежну безпеку об'єктів та економічну ефективність експлуатації електротехнічних комплексів.

У процесі виконання роботи проведено аналіз конструктивних особливостей болтових струмоведучих з'єднань, фізичних процесів, що відбуваються в зоні електричного контакту, а також досліджено механізми виникнення перехідного опору та його вплив на тепловий стан контактного вузла. Встановлено, що фактична площа електричного контакту є значно меншою за геометричну площу стикування провідників, що обумовлено мікронерівностями контактних поверхонь. Саме це призводить до локальної концентрації струму, зростання густини струму в окремих контактних точках та інтенсивного локального тепловиділення.

На основі проведеного аналізу підтверджено, що основними причинами перегріву болтових струмоведучих з'єднань є ослаблення механічного контактного натискання, корозія та окислення контактних поверхонь, температурні деформації конструктивних елементів, вплив вібраційних навантажень, циклічні зміни температури навколишнього середовища, а також експлуатація в умовах змінного або пікового струмового навантаження.

Встановлено, що навіть незначне збільшення перехідного опору призводить до суттєвого підвищення теплових втрат відповідно до закону Джоуля–Ленца, що створює передумови для розвитку аварійних процесів.

Проведений аналіз літературних джерел та існуючих технічних рішень показав, що традиційні методи технічного контролю стану струмоведучих контактних з'єднань, зокрема періодичні огляди, контактні вимірювання температури та електричні методи контролю опору, не завжди забезпечують своєчасне виявлення початкових стадій деградації контактного вузла. Особливо це стосується випадків, коли розвиток дефекту має поступовий характер і не супроводжується різким зростанням температури на ранньому етапі.

У роботі досліджено математичні моделі теплових процесів у струмоведучих болтових з'єднаннях, що дозволило описати закономірності зміни температурного стану контактного вузла в різних режимах експлуатації. Розглянуто стаціонарні, перехідні, детерміновані та випадкові режими струмового навантаження. Отримано аналітичні залежності, що дозволяють оцінювати температуру струмоведучого болтового з'єднання з урахуванням струмового навантаження, температури навколишнього середовища, електричного опору провідникового матеріалу та величини перехідного опору.

Результати математичного моделювання підтвердили, що температурний стан контактного з'єднання має нелінійний характер залежно від зміни параметрів навантаження. Встановлено, що в умовах динамічних режимів експлуатації використання лише статичних критеріїв оцінки технічного стану є недостатнім, оскільки теплові процеси характеризуються інерційністю, а розвиток аварійного режиму може мати прихований характер.

Одним із ключових результатів роботи стало вдосконалення теплового методу контролю технічного стану струмоведучих болтових з'єднань. Запропонований підхід дозволяє визначати початковий момент ослаблення болтового з'єднання за зміною температурних параметрів у режимі реального часу. На відміну від традиційних методів, запропонований метод враховує не

лише абсолютне значення температури, але й динаміку її зміни, вплив навколишнього середовища та режим струмового навантаження.

У межах дослідження розроблено функціональні моделі контролю стану болтових струмоведучих з'єднань для стаціонарного, детермінованого та випадкового режимів навантаження. Запропоновано використання булевих діагностичних функцій для формалізації критеріїв оцінки стану з'єднання та автоматизованого виявлення початкової стадії аварійного процесу. Це дозволяє створити основу для впровадження автоматизованих систем технічного моніторингу електротехнічного обладнання.

Особливу увагу у роботі приділено прогнозуванню розвитку аварійних процесів у контактних з'єднаннях. Запропоновано підхід, заснований на використанні постійної нагріву як діагностичного параметра, що дозволяє оцінювати швидкість розвитку дефекту та прогнозувати час досягнення критичного температурного стану. Це має важливе практичне значення, оскільки дозволяє здійснювати планове технічне обслуговування без аварійного відключення обладнання.

Експериментальна частина роботи підтвердила адекватність теоретичних положень та математичних моделей. Для проведення експериментальних досліджень було використано цифровий мікроомметр для вимірювання перехідного опору контактних з'єднань, а також організовано дослідження теплових режимів струмоведучих болтових з'єднань при різних значеннях опору.

Експериментально досліджено три режими роботи з різними значеннями перехідного опору: 180 мОм, 240 мОм та 340 мОм. Встановлено, що зміна величини перехідного опору суттєво впливає на динаміку нагріву контактного вузла, швидкість досягнення критичних температур та загальний характер теплового процесу. Підтверджено, що зі збільшенням перехідного опору відбувається погіршення електричного контакту та зростання ризику аварійного перегріву.

Аналіз експериментальних даних показав наявність стійкої залежності між величиною контактного опору та температурним режимом з'єднання. Отримані графічні залежності дозволили підтвердити нелінійний характер нагріву струмоведучих болтових з'єднань, що узгоджується з результатами математичного моделювання.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для вдосконалення систем технічної діагностики електротехнічного обладнання, розроблення автоматизованих систем моніторингу стану контактних з'єднань, підвищення надійності електропостачання промислових та спеціалізованих об'єктів, а також запобігання аварійним ситуаціям, пов'язаним із перегрівом контактних вузлів.

Результати дослідження можуть бути використані при проектуванні систем дистанційного теплового контролю електроустановок, модернізації існуючих систем технічного обслуговування, а також при створенні інтелектуальних систем діагностики електротехнічного обладнання.

Таким чином, поставлена у магістерській роботі мета — дослідження теплових характеристик болтових струмоведучих з'єднань електротехнічного комплексу, аналіз причин їх перегріву, математичне моделювання динамічних теплових режимів та експериментальне підтвердження закономірностей зміни температурного стану — повністю досягнута. Усі поставлені завдання виконані в повному обсязі, а отримані результати мають як наукову, так і практичну цінність для подальшого розвитку систем технічної діагностики та підвищення надійності електротехнічних комплексів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Правила улаштування електроустановок. Київ : Міненерговугілля України, 2017.
2. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. Київ, 2023.
3. ДСТУ EN 61439-1:2017 Низьковольтні комплектні пристрої керування та розподілу електроенергії. Частина 1.
4. ДСТУ EN 60947-1:2015 Апаратура комутаційна та керування низьковольтна. Частина 1.
5. ДСТУ ІЕС 60050 Міжнародний електротехнічний словник.
6. Кузьмінський А. В. Електротехнічні матеріали. Київ : Ліра-К, 2020.
7. Бойко В. С. Основи електротехніки. Київ : Каравела, 2019.
8. Сегеда М. С. Електричні мережі та системи. Львів : Львівська політехніка, 2018.
9. Костюк В. І. Теоретичні основи електротехніки. Київ : Вища школа, 2018.
10. Праховник А. В. Електропостачання промислових підприємств. Київ, 2019.
11. Лежнюк П. Д. Електричні системи та мережі. Вінниця : ВНТУ, 2020.
12. Ткаченко В. І. Технічна діагностика електрообладнання. Харків : Факт, 2021.
13. Малахов В. П. Контроль і діагностика електрообладнання. Київ, 2020.
14. Онищенко Г. Б. Методи неруйнівного контролю електрообладнання. Київ, 2021.
15. Петренко О. М. Надійність електротехнічних систем. Дніпро, 2019.
16. Шевченко С. П. Контактні з'єднання в електроустановках. Київ, 2020.

17. Ковальчук І. О. Теплові процеси в електротехнічних системах. Львів, 2021.
18. Журнал 'Технічна електродинаміка'. Наукові статті 2019–2024 рр.
19. Вісник НТУУ КПІ. Серія Електротехніка та електромеханіка. 2020–2024 рр.
20. Наукові праці Вінницького національного технічного університету. 2020–2024 рр.
21. Методичні вказівки з виконання магістерських кваліфікаційних робіт з електротехніки. Київ, 2024.
22. ДСТУ 8302:2015 Інформація та документація. Бібліографічне посилання.
23. ДСТУ EN 60529:2018 Ступені захисту оболонок.
24. ДСТУ EN 60204-1:2015 Безпечність машин. Електрообладнання машин.
25. ДСТУ EN 61557 Електробезпека в низьковольтних мережах.
26. Довідник електрика / за ред. М. П. Бондаренка. Київ, 2020.
27. Електротехнічний довідник. Київ : Техніка, 2019.
28. Діагностика технічного стану енергетичного обладнання : навч. посіб. Київ, 2022.
29. Основи теплотехнічних вимірювань : навч. посіб. Львів, 2021.
30. Автоматизовані системи моніторингу електрообладнання. Харків, 2022.
31. IEC 60947-1 Low-voltage switchgear and controlgear – Part 1.
32. IEC 61439-1 Low-voltage switchgear and controlgear assemblies – Part 1.
33. IEEE Std 837-2014 Standard for Permanent Connections Used in Grounding.
34. Holm R. Electric Contacts: Theory and Application.
35. Slade P. Electric Contacts: Principles and Applications.
36. Braithwaite J. Electrical Power Equipment Maintenance and Testing.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Технічні характеристики та склад експериментальної бази

У додатку наведено узагальнений перелік обладнання, засобів вимірювання та контрольованих параметрів, які використовуються для дослідження теплового стану струмоведучих болтових з'єднань. Основним вимірювальним приладом є цифровий мікроомметр LICA-105, застосований для контролю малих значень перехідного опору контактних з'єднань. Експериментальна база забезпечує моделювання навантаження, контроль струму, напруги, температури та опору з'єднання.

Таблиця А.1 - Склад експериментальної установки

№	Елемент установки	Функціональне призначення	Контрольований параметр
1	Джерело живлення 230 В	Живлення дослідного електричного кола	Напруга живлення
2	Навантажувальний елемент	Створення струмового навантаження в колі	Струм навантаження
3	Досліджуване болтове з'єднання	Об'єкт дослідження теплового стану	Температура, перехідний опір
4	Цифровий мікроомметр LICA-105	Вимірювання малих опорів контактних з'єднань	Перехідний опір
5	Амперметр / струмовий датчик	Контроль струму, що протікає через з'єднання	I, А
6	Вольтметр	Контроль напруги в дослідному колі	U, В
7	Температурний датчик / термометр	Вимірювання температури контактної зони	t, °C
8	З'єднувальні провідники та затискачі	Забезпечення електричного контакту між елементами схеми	Якість підключення

Таблиця А.2 - Узагальнені технічні характеристики мікроомметра LICA-105 у межах дослідження

Показник	Характеристика / вимога	Пояснення
Призначення	Вимірювання малих значень електричного опору	Дає змогу оцінити стан контактного з'єднання за величиною перехідного опору
Метод вимірювання	Чотирипровідна схема	Зменшує вплив опору вимірювальних проводів на результат

Тип індикації	Цифрова	Забезпечує зручність фіксації результатів
Об'єкти контролю	Болтові, гвинтові та контактні з'єднання	Застосовується для електроустановок низької напруги
Режим застосування	Лабораторний або польовий контроль	Може використовуватися під час технічного обслуговування
Основний результат	Значення перехідного опору	Використовується для висновку про якість контакту

Таблиця А.3 - Контрольовані параметри експерименту

Параметр	Позначення	Одиниця вимірювання	Призначення в дослідженні
Струм навантаження	I	А	Визначає інтенсивність тепловиділення у з'єднанні
Напруга живлення	U	В	Характеризує режим живлення експериментального кола
Перехідний опір	R _{пер}	мОм	Основний показник якості контактного з'єднання
Температура контактної зони	t _к	°С	Показник теплового стану болтового з'єднання
Температура навколишнього середовища	t _{нс}	°С	Використовується для коригування температурних розрахунків
Час нагріву	T	хв	Дас змогу оцінити динаміку теплового процесу

ДОДАТОК Б

Вихідні експериментальні дані та таблиці вимірювань

Експериментальні дослідження виконувалися за однакових умов живлення: струм навантаження становив 30 А, напруга живлення - 230 В. Досліджувалися три значення перехідного опору: 340 мОм, 240 мОм та 180 мОм. Температура фіксувалася в процесі нагріву контактного з'єднання.

Таблиця Б.1 - Загальні умови проведення експерименту

№ досліді	Струм, А	Напруга, В	Перехідний опір, мОм	Мета досліді
1	30	230	340	Оцінка нагріву при найбільшому перехідному опорі
2	30	230	240	Оцінка нагріву при середньому перехідному опорі

3	30	230	180	Оцінка нагріву при найменшому перехідному опорі
---	----	-----	-----	---

Таблиця Б.2 - Динаміка нагріву з'єднання при $R_{пер} = 340 \text{ мОм}$

Пок азник										0
Час Т, хв		,5	,0	,6	,0	,8	,1	,5	,1	,1
Тем- пература t, °C	9	1	3	5	8	0	2	4	6	0

Таблиця Б.3 - Динаміка нагріву з'єднання при $R_{пер} = 240 \text{ мОм}$

Пок азник										0
Час Т, хв		,0	,5	,0	,3	,6	,9	,1	,3	,9
Тем- пература t, °C	9	2,5	5	7	9,5	2	5	7,5	9,5	2

Таблиця Б.4 - Динаміка нагріву з'єднання при $R_{пер} = 180 \text{ мОм}$

Пок азник										0
Час Т, хв		,0	,5	,0	,3	,6	,9	,1	,3	,5
Тем- пература t, °C	9	5	8	1	4	7	0	2	5	7

Таблиця Б.5 - Узагальнення результатів експериментальних досліджень

Перехідн ий опір, мОм	Початко ва температура, °C	Максималь на зафіксована температура, °C	Час досягнення температур и близько 40 °C, хв	Висновок
340	19	40	5,1	Нагрів відбувається повільніше, але з'єднання досягає контрольного рівня температури
240	19	42	3,9	Спостерігаєть ся швидше зростання температури

				порівняно з $R_{пер} = 340 \text{ мОм}$
180	19	47	3,5	Зафіксовано найбільш інтенсивний нагрів у наведених умовах дослідів

Наведені таблиці використовуються для побудови графіків динаміки нагріву контактної з'єднання та залежності часу нагріву від величини перехідного опору. При аналізі результатів основна увага приділяється зміні температури у часі, оскільки саме цей показник є найбільш інформативним для діагностики теплового стану контактної вузла.

ДОДАТОК В

Розрахункові залежності та формули, використані у роботі

У додатку систематизовано основні розрахункові залежності, що використовуються для аналізу теплового стану струмоведучих болтових з'єднань. Формули застосовуються для визначення теплових втрат, температурного режиму, впливу перехідного опору та прогнозування розвитку аварійного процесу.

Таблиця В.1 - Основні формули для аналізу теплового стану СБЗ

№	Формула	Пояснення	Позначення
1	$Q = I^2 R t$	Кількість теплоти, що виділяється у контактному з'єднанні за законом Джоуля-Ленца	I - струм; R - опір; t - час
2	$P = I^2 R$	Потужність теплових втрат у контактній зоні	P - тепла потужність втрат
3	$R = \rho l / S$	Активний опір провідника	ρ - питомий опір; l - довжина; S - площа перерізу
4	$R\theta = R_0[1 + \alpha(\theta - \theta_0)]$	Зміна опору з урахуванням температури	α - температурний коефіцієнт опору
5	$\theta = \theta_{уст} - (\theta_{уст} - \theta_0)e^{(-t/T)}$	Закон нагріву однорідного тіла	T - постійна нагріву; $\theta_{уст}$ - стала температура
6	$\Delta\theta = \theta_k - \theta_{нс}$	Перевищення температури контактної з'єднання над температурою середовища	θ_k - температура контакту; $\theta_{нс}$ - температура навколишнього середовища

Таблиця В.2 - Параметри, що впливають на тепловий режим болтового з'єднання

Група факторів	Конкретний фактор	Вплив на стан з'єднання
Електричні	Струм навантаження	Зі збільшенням струму теплові втрати зростають пропорційно квадрату струму
Електричні	Перехідний опір	Збільшення опору спричиняє локальний перегрів контактної зони
Механічні	Момент затягування болта	Недостатнє зусилля затягування зменшує фактичну площу контакту
Конструктивні	Матеріал шин і наконечників	Визначає електропровідність, теплопровідність і схильність до окислення
Експлуатаційні	Вібραції та циклічні навантаження	Можуть спричинити поступове ослаблення з'єднання
Кліматичні	Вологість та агресивне середовище	Прискорюють корозію контактних поверхонь

ДОДАТОК Г

Алгоритми діагностики та контролю стану струмоведучих болтових з'єднань

Алгоритми призначені для виявлення початкового моменту ослаблення болтового з'єднання, визначення передаварійного стану та формування аварійного сигналу. В основу алгоритму покладено порівняння фактичної температури контактного з'єднання з розрахунковою температурою справного з'єднання з урахуванням струму навантаження та температури навколишнього середовища.

Таблиця Г.1 - Загальний алгоритм контролю стану СБЗ

Крок	Дія	Результат виконання
1	Запуск системи контролю та ініціалізація датчиків	Система переходить у режим опитування параметрів
2	Вимірювання струму навантаження I	Отримання фактичного значення струму
3	Вимірювання температури болтового з'єднання $t_{бз}$	Отримання фактичної температури контрольованого вузла
4	Вимірювання температури навколишнього середовища $t_{нс}$	Урахування впливу зовнішніх умов
5	Розрахунок температури справного з'єднання $t_{розр}$	Формування еталонного значення
6	Порівняння $t_{бз}$ і $t_{розр}$	Визначення відхилення фактичного стану від нормального

7	Перевірка температури $t_{доп}$	допустимої	Виявлення передаварійного режиму
8	Перевірка температури $t_{кр}$	критичної	Виявлення аварійного режиму
9	Формування сигналу: норма / попередження / аварія		Передача інформації персоналу або системі захисту

Таблиця Г.2 - Логіка прийняття діагностичного рішення

Умова	Стан з'єднання	Дія системи
$t_{бз} \leq t_{розр} + \Delta t_{доп}$	Нормальний режим	Продовження моніторингу
$t_{бз} > t_{розр} + \Delta t_{доп}$	Початок ослаблення або погіршення контакту	Формування попереджувального сигналу
$t_{бз} \geq t_{доп}$	Передаварійний режим	Рекомендація до огляду або зниження навантаження
$t_{бз} \geq t_{кр}$	Аварійний режим	Формування аварійного сигналу та відключення обладнання
$I = 0$, але $t_{бз}$ зростає	Ненормальний тепловий процес	Додаткова перевірка датчиків і контактної зони

Псевдокод алгоритму роботи мікроконтролера:

1. Зчитати значення I , $t_{бз}$, $t_{нс}$.
2. Обчислити $t_{розр}$ для справного болтового з'єднання.
3. Якщо $t_{бз} \leq t_{розр} + \Delta t_{доп}$, встановити стан «Норма».
4. Якщо $t_{бз} > t_{розр} + \Delta t_{доп}$, встановити стан «Попередження».
5. Якщо $t_{бз} \geq t_{доп}$, встановити стан «Передаварійний режим».
6. Якщо $t_{бз} \geq t_{кр}$, встановити стан «Аварія» та передати команду на відключення.
7. Записати результати вимірювання в журнал контролю.
8. Повторити цикл після завершення інтервалу дискретизації Δt .

ДОДАТОК Д

Структура пристроїв контролю та діагностики

Пристрій контролю призначений для безперервного моніторингу стану струмоведучих болтових з'єднань, зокрема у важкодоступних місцях електроустановок. Основними функціями пристрою є вимірювання температури контактної з'єднання, вимірювання температури навколишнього середовища,

контроль струму навантаження, обробка сигналів мікроконтролером і передача інформації технічному персоналу.

Таблиця Д.1 - Основні блоки пристрою контролю СБЗ

№	Блок пристрою	Призначення	Вхідні / вихідні дані
1	Блок вимірювання температури СБЗ	Фіксація температури контрольованого болтового з'єднання	Вхід: температура; вихід: цифровий або аналоговий сигнал
2	Блок вимірювання температури середовища	Урахування впливу зовнішніх умов	Вхід: tнс; вихід: сигнал коригування
3	Блок вимірювання струму	Контроль струму навантаження	Вхід: струм кола; вихід: сигнал, пропорційний I
4	Мікроконтролер	Обробка сигналів, розрахунок контрольних параметрів, прийняття рішення	Вхід: сигнали датчиків; вихід: команда / повідомлення
5	Блок живлення	Забезпечення живлення електронних модулів	Вхід: джерело живлення; вихід: стабілізована напруга
6	Прийомопередавач / модуль зв'язку	Передача даних про стан СБЗ	Вихід: повідомлення оператору або системі моніторингу
7	Сигнальний блок	Візуальна або звукова індикація стану	Сигнали: норма, попередження, аварія

Таблиця Д.2 - Режими роботи пристрою контролю

Режим	Опис	Діагностична ознака	Реакція системи
Нормальний	Температура з'єднання відповідає розрахунковому значенню	Відсутність перевищення допустимого відхилення	Періодичне опитування датчиків
Передаварійний	Фактична температура перевищує розрахункову	Початок зростання перехідного опору	Попередження персоналу
Аварійний	Температура досягає критичного рівня	Інтенсивний перегрів контактного вузла	Аварійний сигнал і відключення
Контроль обриву	Струм у фазі відсутній або різко зменшений	Можливий неповнофазний режим	Формування сигналу про порушення цілісності кола

ДОДАТОК Е

Практичні рекомендації та контрольна карта технічного обслуговування

Результати дослідження можуть бути використані під час технічного обслуговування електроустановок, розподільчих пристроїв, силових шаф і електротехнічних комплексів. Основна мета практичного впровадження - своєчасне виявлення зростання перехідного опору, попередження локального перегріву та зменшення ризику аварійного пошкодження обладнання.

Таблиця Е.1 - Рекомендації щодо контролю стану контактних болтових з'єднань

№	Рекомендація	Очікуваний результат
1	Проводити періодичний тепловізійний контроль контактних з'єднань	Виявлення локальних зон перегріву без відключення обладнання
2	Виконувати вимірювання перехідного опору мікроомметром	Оцінка якості електричного контакту
3	Контролювати момент затягування болтових з'єднань	Запобігання ослабленню контакту
4	Очищати контактні поверхні від оксидних плівок і забруднень	Зменшення перехідного опору
5	Застосовувати контактні пасти та антикорозійний захист	Підвищення стабільності контакту
6	Вести журнал вимірювань температури та опору	Можливість аналізу динаміки зміни стану
7	Встановлювати автоматизовані системи моніторингу для відповідальних вузлів	Раннє виявлення аварійних режимів

Таблиця Е.2 - Контрольна карта огляду болтового струмоведучого з'єднання

Пункт контролю	Норма / допустимий стан	Виявлене відхилення	Рішення
Стан контактних поверхонь	Відсутність окислення, слідів підгоряння та забруднення		
Стан болтів, гайок, шайб	Відсутність механічних пошкоджень і послаблення		
Температура контактної зони	Не перевищує допустиме значення для даного типу з'єднання		
Перехідний опір	Не перевищує контрольне значення, встановлене для конкретного вузла		

Якість ізоляції поблизу з'єднання	Відсутність потемніння, оплавлення, тріщин		
Симетрія фазних струмів	Відсутність суттєвого перекосу струмів		
Результати попереднього огляду	Немає негативної динаміки параметрів		

Під час експлуатації особливу увагу слід приділяти з'єднанням, що працюють у режимах змінного навантаження, підвищеної вологості, вібрації або високої температури навколишнього середовища. Такі умови прискорюють деградацію контактних поверхонь і можуть призвести до збільшення перехідного опору.

ДОДАТОК Ж

Форма журналу експериментальних вимірювань та моніторингу

Для систематизації результатів досліджень і подальшого технічного аналізу доцільно використовувати журнал вимірювань. Журнал дозволяє порівнювати значення температури та перехідного опору у часі, виявляти тенденції погіршення стану контакту та планувати технічне обслуговування.

Таблиця Ж.1 - Рекомендована форма журналу вимірювань

Дата	Об'єкт контролю	А	В	R _{пер, МОм}	t _{бз, °C}	t _{нс, °C}	C _{тан}	Примітка

Таблиця Ж.2 - Шкала якісної оцінки стану болтового з'єднання

Оцінка	Ознаки	Рекомендована дія
Добрий стан	Температура та опір стабільні, ознаки перегріву відсутні	Продовжити плановий контроль
Задовільний стан	Є незначне підвищення температури або опору	Скоротити інтервал між перевітками
Передаварійний стан	Температура перевищує розрахункове значення, спостерігається негативна динаміка	Провести огляд, підтягування, очищення або ремонт
Аварійний стан	Температура досягає критичного рівня, можливе	Відключити обладнання та усунути дефект

	пошкодження ізоляції або контактної зони	
--	--	--

ДОДАТОК И

Перелік матеріалів, винесених у додатки

Таблиця И.1 - Структура додатків магістерської кваліфікаційної роботи

Додаток	Назва	Зміст матеріалів
А	Технічні характеристики та склад експериментальної бази	Обладнання, засоби вимірювання, контрольовані параметри
Б	Вихідні експериментальні дані	Таблиці температури, часу нагріву та узагальнення результатів
В	Розрахункові залежності	Формули теплових втрат, нагріву та параметри впливу
Г	Алгоритми діагностики	Послідовність контролю, логіка прийняття рішення, псевдокод
Д	Структура пристроїв контролю	Блоки пристрою, режими роботи та функціональні зв'язки
Е	Практичні рекомендації	Рекомендації з обслуговування та контрольна карта огляду
Ж	Журнал вимірювань	Форми для фіксації результатів моніторингу
И	Перелік матеріалів додатків	Узагальнена структура додаткових матеріалів