

**ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ**  
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля  
Національного університету цивільного захисту України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ЗОБЕНКО ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ**

УДК 614.841.45

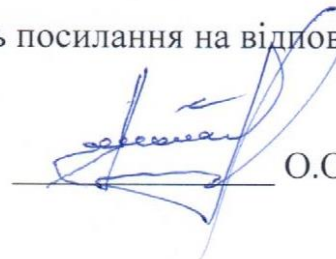
**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОТИПОЖЕЖНОГО**  
**ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ В МІСЦЯХ КОМУТАЦІЇ**  
**НАДМІРНИХ СПОЖИВЧИХ ПОТУЖНОСТЕЙ**

Спеціальність – 261 пожежна безпека

Галузь знань – 26 цивільна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

  
О.О. Зобенко

Науковий керівник: Землянський Олег Миколайович  
доктор технічних наук, професор

Черкаси – 2024

## АНОТАЦІЯ

*Зобенко О.О.* Підвищення ефективності протипожежного захисту електричних мереж в місцях комутації надмірних споживчих потужностей. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 – «Пожежна безпека» – Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Черкаси, 2024.

Дисертацію присвячено вирішенню важливого наукового завдання у сфері пожежної безпеки електричних мереж. Запропоновано шляхи вдосконалення ефективності протипожежного захисту електричних мереж в умовах підвищеного локального нагріву в місцях комутації надмірних споживчих потужностей, що забезпечує мінімізацію наслідків загоряння та унеможлиблює подальший розвиток пожежі.

**Мета роботи** – підвищення ефективності протипожежного захисту електричних мереж, які функціонують в умовах надмірного локального нагріву, за рахунок розробки елемента (розеткового модуля) із вбудованим температурним запобіжником.

Для досягнення поставленої мети окресленого дослідження було вирішено такі наукові завдання.

1. Проаналізувати сучасний стан з підвищення ефективності протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей.

2. Розробити структурно-логічну модель елемента системи протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей.

3. Розробити математичну модель протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей.

4. Розробити фізичну модель елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей.

5. Перевірити достовірність та варіанти впровадження розроблених моделей протипожежного захисту та висунути пропозиції з упровадження розроблених моделей.

Об'єкт дослідження: процеси підвищення ефективності протипожежного захисту електричних мереж.

Предмет дослідження: параметри протипожежного захисту елементів електричних мереж у місцях комутації, які обумовлені надмірним локальним нагрівом.

У дисертації для розроблення моделей застосовано методи системного, структурного, функціонального й математичного аналізу, теорії математичної статистики; для оцінювання ефективності математичного моделювання – теорія ймовірностей, метод морфологічного аналізу, методи планування наукових експериментів і обробки їх результатів, які уможливили достовірність отриманих результатів і сформульованих висновків.

У процесі виконання дослідження вперше отримано такі наукові результати.

1. Розроблено структурно-логічну модель елемента системи протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей, що складається з двох контурів управління процесом протипожежного захисту: контуру управління в умовах достатності протипожежного захисту (достатнього) та контуру управління процесом протипожежного захисту в умовах комутації надмірних споживчих потужностей (інноваційного), який функціонує в разі встановлення факту наявності обмежень достатності протипожежного захисту. Він складається з восьми блоків, а саме: розроблення нових нормативно-правових актів; створення інноваційних технічних засобів захисту; розв'язування окремої

задачі щодо визначення перехідних процесів під час короткого замикання; розв'язування окремої задачі величини струмів короткого замикання; розв'язування окремої задачі визначення температури та часу спрацювання плавкого запобіжника; побудова математичної моделі попередження пожежі; формування методики попередження пожежі за рахунок інноваційного технічного засобу захисту; вироблення управлінських рішень щодо заходів безпеки об'єкту захисту.

2. Розроблено математичну модель протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей, яка являє собою систему з двох аналітичних залежностей. Перша описує залежність основних параметрів елементу системи протипожежного захисту від основних параметрів електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей. Друга дозволяє визначити ефективні параметри елементу системи протипожежного захисту залежно від варіантів розв'язування окремих задач: з визначення перехідних процесів під час короткого замикання; з визначення розрахунку струмів короткого замикання; з визначення температури та часу спрацювання плавкого запобіжника.

3. Розроблено фізичну модель елементу протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей, яка спирається на процес розмикання електричного кола за умови перегрівання з'єднання в місцях надмірних споживчих потужностей за умови постійної візуалізації світлової індикації працездатності чи спрацювання теплового запобіжника елементу протипожежного захисту.

У **вступі** обґрунтовано актуальність напряду дослідження за обраною темою; показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами; сформульовано мету й завдання дисертаційного дослідження; розкрито наукову новизну отриманих результатів і практичну значущість роботи; наведено дані про особистий внесок здобувача й упровадження результатів дисертації.

У першому розділі **«Сучасний стан з підвищення ефективності протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей»** проаналізовано шляхи підвищення протипожежного захисту споруд та електричних мереж, акцентовано увагу на стійкій тенденції до збереження кількості пожеж, викликаних джерелами запалення електричного походження. Незважаючи на розвиток сучасних апаратів захисту, електричні розетки залишаються одним із місць, де внаслідок виникнення великого перехідного опору можуть відбуватися значні тепловиділення. Для попередження небезпечного виділення тепла запропоновано обладнати електричний елемент системи протипожежної безпеки електричних мереж температурними запобіжниками, які спрацюватимуть у разі перевищення допустимої температури з'єднання і припинятимуть подальше нагрівання шляхом розмикання електричного кола.

У другому розділі **«Структурно-логічна модель елемента системи протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей»** проаналізовано причини виникнення пожеж та шляхи підвищення пожежної безпеки електричних розеток. Розроблено інноваційну структурно-логічну модель елемента системи протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей. Запропоновано ефективні параметри елемента системи протипожежного захисту.

У третьому розділі **«Математична модель протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей»** досліджено поле формування математичної моделі. Отримано розв'язок окремої задачі з визначення перехідних процесів у разі короткого замикання. Розв'язано окремі задачі з розрахунку струмів короткого замикання й визначення температури та часу спрацювання плавкого запобіжника. Подано результати дослідження щодо опису математичної

моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей.

У четвертому розділі **«Фізична модель елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей»** розроблено фізичну модель елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей, інтегровано математичну модель у фізичну. Визначено основні підходи до розроблення фізичної моделі елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей. Запропоновано опис фізичної моделі елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей.

У п'ятому розділі **«Перевірка достовірності розроблених моделей»** доведено, що результати всіх натурних експериментів елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей, який побудовано за принципом, розглянутим у фізичній моделі, і теоретично розраховані значення опору та сили струму в місцях надмірної комутації, як складові численних експериментів, розташовуються в межах довірчих інтервалів, розрахованих відповідно до критерію Ст'юдента з надійністю 0,95. Це свідчить про хорошу збіжність результатів емпіричних досліджень і теоретичних розрахунків та уможливорює коректні висновки в процесі наукової розвідки, підтверджуючи достовірність математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей.

Також запропоновано варіанти впровадження розроблених моделей. Доведено, що найбільш ефективним застосуванням розроблених моделей протипожежного захисту електричних мереж в місцях комутації надмірних споживчих потужностей є сучасна електрична розетка з температурними запобіжниками, які спрацюватимуть у разі перевищення допустимої температури з'єднання й припинятимуть подальше нагрівання шляхом

розмикання електричного кола. Перспективним убачається використання її в усіх наявних вітчизняних системах протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей.

**Ключові слова:** математична модель, фізична модель, електрична мережа, пристрої захисту електрообладнання, місця комутації надмірних споживчих потужностей, пожежна небезпека, штепсельне з'єднання.

### **Список опублікованих праць за темою дисертації**

Наукові праці, у яких опубліковані основні результати дисертаційного дослідження:

#### **Статті в наукових фахових виданнях України**

1. Землянський О.М., Мирошник О.М., Зобенко О.О., Лесечко Д.В. Розроблення розеточного модуля електричної мережі. *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. 2020. Т. 4. №2. С.20-28.

DOI:10.31731/2524-2636.2020.4.2.- 20 – 28

2. Зобенко О.О. Математична модель протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації під час надмірного локального нагрівання. *Науково-технічний збірник «Комунальне господарство міст»*. 2022. Т. 4. Вип. 171. С. 101–106.

DOI:10.33042/2522-1809-2022-4-171-101-106

3. Зобенко О.О. Сучасний стан з підвищення ефективності протипожежного захисту електричних мереж в місцях комутації надмірних споживчих потужностей. *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. 2022. Т. 6. №1. С.20-28.

DOI:10.31731/2524.2636.2022.6.1.20-28

4. Зобенко О.О. Модель протипожежного захисту електричних мереж у місцях контактних з'єднань. *Науковий вісник. Серія «Цивільний захист та пожежна безпека»*. 2022. Вип. № 1 (13). С.141-148.

DOI:10.33269/nvcz.2023.1.141-148

**Публікації у наукових виданнях, що входять до бази даних Scopus:**

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Borisenko, I., Burmenko, O., Deyneko, N., Zobenko, O., Yivzhenko, Y., Kamyshentsev, G., Muraviov, V., Mykhailovska, Y., Khrystych, V., Kryvonis, S. Development of a method for producing effective solar elements CdS/CdTe/Cu/Au on a flexible substrate designed for backup supplying systems prevention of emergency situations. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 6/5, no. 114. P. 6–11. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.247720

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.247720

2. Zobenko, O.; Loboichenko, V.; Lutsenko, Y.; Pidhornyy, M.; Zemlianskyi, O.; Hrushovinchuk, O.; Blyashenko, O.; Servatyuk, V. Study of the Features of the Protection of Energy System Elements Caused by Excessive Local Heating. *Water and Energy International*. 2023. Vol. 65r, no. 10. P. 34–40.

<https://indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:wei&volume=65r&issue=10&article=005>

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

**Патент на корисну модель**

Електрична розетка з тепловим захистом та світловими індикаторами : пат. 147146 Україна : H02H 5/04 (2006.01). № u 2020 07858; заявл. 09.12.2020; опубл. 14.04.2021, Бюл. № 15. 3 с.

<https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=275533&chapter=description>



**Матеріали науково-практичних конференцій, що засвідчують  
апробацію дисертації**

1. Станько Д. А., Зобенко О.О. Попередження пожеж в місцях роз'ємних з'єднань. *Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених: тези доп. учасників Всеукраїнської наук.-практ. конф. курсантів та студентів, м. Черкаси, 13 трав. 2021 р.* / Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. С. 63-64.

<https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2021/8.pdf>

2. Сотоцька С. О., Носова Д. А., Зобенко О. О., Землянський О. М. Підвищення безпеки електричних розеток за рахунок використання температурного захисту: *матеріали X Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю, м. Черкаси, 29-30 жовт. 2020 р.* / Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. С. 224.

<https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2020/1/1.pdf>

3. Zobenko Oleksandr. Determination of features of temperature fuses application in detachable connections. *Technical sciences scientific bases of modern investigations, c.244.*

<https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2022/02/SCIENTIFIC-BASES-OF-MODERN-INVESTIGATIONS.pdf>

4. Zobenko Oleksandr, Zemlianskiy Oleh, Myroshnyk Oleh. Increasing the efficiency of fire protection of electrical network switching apparatus. *Technical sciences science, development and the latest development trends, C. 381*

<https://books.google.com.ua/books/publisher/content?id=hDiKEAAAQBAJ&hl=uk&pg=PA381&img=1&zoom=3&sig=ACfU3U2mFNVcgOOPqJtzpXwX43VN7oyQWw&w=1280>

5. Олександр Зобенко, Олег Землянський. Математична модель протипожежного захисту електричних мереж в місцях комутації під час локального перегріву: *матеріали Міжнародної науково-практичної*

конференції «Проблеми пожежної безпеки 2022» («Fire safety issues 2022»), м. Харків, 2022 р. / Національний університет цивільного захисту України. Харків, 2022. С. 18.

<http://fsi.nuczu.edu.ua/FSI-2022-collection-2.pdf>

6. О.О. Зобенко, О.М. Землянський, О.М. Мирошник. Підвищення ефективності протипожежного захисту апаратів комутації електричних мереж: матеріали XII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист», м. Черкаси, 27-28 жовт. 2022 р. / Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022. С. 96.

<https://chipb.dsns.gov.ua/upload/1/5/1/1/8/0/1/gTG4Mzjniuitb9Waoili99FDDQUI4FF3CEp78K5A.pdf>

7. О.О. Зобенко, О.М. Землянський. Фізична модель протипожежного захисту електричних мереж в місцях локального перегрівання: матеріали II Всеукраїнської наукової конференції студентів та молодих вчених «Наукові досягнення та відкриття сучасної молоді», м. Луцьк, 31 трав. 2023 р. / Держ. вищ. навч. заклад «Донецький національний технічний університет». Луцьк, 2023. С. 174-176.

[https://donntu.edu.ua/wp-content/uploads/2024/03/2023\\_zbirnyk\\_naukovi-vidkryttya-suchasnoyi-molodi.pdf](https://donntu.edu.ua/wp-content/uploads/2024/03/2023_zbirnyk_naukovi-vidkryttya-suchasnoyi-molodi.pdf)

8. Зобенко О., Гвоздь В., Землянський О., Радущка Д. Розробка ефективності протипожежного захисту електричних мереж в місцях підвищених перехідних опорів. «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»: матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист», м. Черкаси, 26-27 жовт. 2023 р. / Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2023. С. 34.

[https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2023/Nadzvicaini\\_situaciyi\\_bezpeka\\_ta\\_zaxist.pdf](https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2023/Nadzvicaini_situaciyi_bezpeka_ta_zaxist.pdf)

## ABSTRACT

Zobenko A.A. Improving the efficiency of fire protection of electrical networks in places of switching excessive consumer capacities. - Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 261 - "Fire Safety" - Cherkasy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, 2024.

The dissertation is devoted to solving an important scientific problem in the field of fire safety of electrical networks. Ways to improve the efficiency of fire protection of electrical networks in conditions of increased local heating in places of switching excessive consumer capacities have been proposed, which ensures minimization of fire consequences and makes it impossible to further develop a fire.

The purpose of the work is to increase the efficiency of fire protection of electrical networks operating in conditions of excessive local heating by developing an element (socket module) with a built-in temperature fuse.

To achieve the goal of the outlined research, the following scientific tasks were solved.

1. Analyze the current state of improving the efficiency of fire protection of electrical networks in places of switching excessive consumer capacities.

2. Develop a structural and logical model of the element of the fire protection system of electrical networks in places of switching of excessive consumer capacities.

3. Develop a mathematical model of fire protection of electrical networks in places of switching excessive consumer capacities.

4. Develop a physical model of the element of fire protection of electrical networks in places of excessive consumer capacity.

5. Check the accuracy and implementation options of the developed fire protection models and put forward proposals for the implementation of the developed models.

Object of research: processes for improving the efficiency of fire protection of electrical networks.

Subject of research: fire protection parameters of elements of electrical networks in places of switching, which are caused by excessive local heating.

In the dissertation for the development of models applied methods of system, structural, functional and mathematical analysis, the theory of mathematical statistics; to assess the effectiveness of mathematical modeling □ probability theory, the method of morphological analysis, methods of planning scientific experiments and processing their results, which made possible the reliability of the results and conclusions formulated.

In the course of the study, the following scientific results were obtained for the first time.

1. The structural and logical model of the element of the fire protection system of electric networks in the places of switching of excessive consumer capacities, consisting of two control loops of the fire protection process: the control loop in the conditions of sufficiency of fire protection (sufficient) and the control loop of the fire protection process in the conditions of switching of excessive consumer capacities (innovative), which functions in case of establishing the fact of the presence of limitations of sufficiency of fire protection, has been developed. It consists of eight blocks, namely: the development of new regulatory legal acts; creation of innovative technical means of protection; solving a separate problem of determining transients during a short circuit; solving a separate problem of the value of short-circuit currents; solving a separate problem of determining the temperature and response time of the fuse; building a mathematical model of fire prevention; formation of fire prevention methodology

due to innovative technical means of protection; development of management decisions on safety measures for the object of protection.

2. A mathematical model of fire protection of electric networks in places of switching of excessive consumer capacities has been developed, which is a system of two analytical dependencies. The first describes the dependence of the main parameters of the element of the fire protection system on the main parameters of electrical networks in places of switching of excessive consumer capacities. The second allows you to determine the effective parameters of the element of the fire protection system, depending on the options for solving individual problems: from the definition of transients during a short circuit; determination of short-circuit currents calculation; determination of fuse operation temperature and time.

3. A physical model of the element of fire protection of electric networks in places of excessive consumer capacities has been developed, which is based on the process of opening the electric circuit under the condition of overheating of the connection in places of excessive consumer capacities under the condition of constant visualization of the light indication of operability or operation of the thermal fuse of the element of fire protection.

**The introduction** substantiates the relevance of the direction of research on the chosen topic; shows the relationship of work with scientific programs, plans, topics; the purpose and objectives of the dissertation research are formulated; the scientific novelty of the obtained results and the practical significance of the work are disclosed; data on the personal contribution of the applicant and the introduction of the results of the dissertation are presented.

**In the first section** "Current state of improving the efficiency of fire protection of electrical networks in places of switching excessive consumer capacities" analyzed ways to increase fire protection of structures and electrical networks, focused attention on a stable trend towards maintaining the number of fires caused by sources of ignition of electrical origin. Despite the development of modern protection devices, electrical outlets remain one of the places where

significant heat emissions can occur due to the occurrence of large transient resistance. To prevent hazardous heat generation, it is proposed to equip the electrical element of the fire safety system of electrical networks with temperature fuses, which will operate in case of exceeding the permissible connection temperature and stop further heating by opening the electric circuit.

**In the second section** "Structural and logical model of the element of the fire protection system of electrical networks in places of switching excessive consumer capacities," the causes of fires and ways to increase the fire safety of electrical outlets are analyzed. An innovative structural and logical model of the element of the fire protection system of electric networks in places of switching of excessive consumer capacities has been developed. Effective parameters of element of fire protection system are proposed.

**In the third section** "Mathematical model of fire protection of electric networks in places of switching of excessive consumer capacities" the field of formation of mathematical model is investigated. The solution of a separate problem of determining transients in the case of a short circuit is obtained. The separate tasks on calculation of short-circuit currents and determination of temperature and time of fuse operation are solved. The results of the study on the description of the mathematical model of fire protection of electrical networks in places of switching of excessive consumer capacities are presented.

**In the fourth section** "Physical model of the element of fire protection of electrical networks in places of switching of excessive consumer capacities" a physical model of the element of fire protection of electric networks in places of excessive consumer capacities was developed, a mathematical model was integrated into the physical one. The main approaches to the development of a physical model of the element of fire protection of electrical networks in places of switching excessive consumer capacities have been determined. Description of physical model of element of fire protection of electric networks in places of excessive consumer capacities is offered.

**In the fifth section** "Validation of the developed models" it is proved that the results of all field experiments of the element of fire protection of electrical networks in places of excessive consumer capacities, which is built on the principle considered in the physical model, and the values of resistance and current strength in places of excessive switching are theoretically calculated, as components of numerical experiments, are located within confidence intervals calculated according to Student's criterion with reliability 0.95. This indicates a good convergence of the results of empirical research and theoretical calculations and makes possible correct conclusions in the process of scientific exploration, confirming the reliability of the mathematical model of fire protection of electrical networks in places of switching excessive consumer capacities.

Variants of implementation of the developed models are also proposed. It is proved that the most effective application of the developed models of fire protection of electric networks in places of switching of excessive consumer capacities is a modern electrical outlet with temperature fuses, which will work in case of exceeding the permissible connection temperature and stop further heating by opening the electric circuit. Promising is its use in all available domestic fire protection systems of electrical networks in places of switching excessive consumer capacities.

**Keywords:** mathematical model, physical model, electrical network, electrical equipment protection devices, places of switching of excessive consumer capacities, fire hazard, plug connection.

## **LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE THEME OF THE DISSERTATION**

### **Articles in scientific and professional publications of Ukraine**

1. Zemlyansky O.M., Miroshnik O.M., Zobenko O.O., Lesechko D.V. Development of the outlet module of the electric network. Collection of scientific works of Cherkasy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Protection of Ukraine "Emergencies: Prevention and Elimination." 2020. T. 4. №2. S.20-28.

DOI:10.31731/2524-2636.2020.4.2.- 20 – 28

2. Zobenko A.A. Mathematical model of fire protection of electrical networks in places of switching during excessive local heating. Scientific and technical collection "Municipal economy of cities." 2022. T. 4. Vol. 171. P. 101-106.

DOI:10.33042/2522-1809-2022-4-171-101-106

3. Zobenko A.A. Current state of improving the efficiency of fire protection of electrical networks in places of switching excessive consumer capacities. Collection of scientific works of Cherkasy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Protection of Ukraine "Emergencies: Prevention and Elimination." 2022. T. 6. №1. S.20-28.

DOI:10.31731/2524.2636.2022.6.1.20-28

4. Zobenko A.A. Model of fire protection of electrical networks at contact connections. Scientific herald. Civil Protection and Fire Safety Series. 2022. Vol. № 1 (13). S.141-148.

DOI:10.33269/nvcz.2023.1.141-148

### **Articles in scientific publications included in the Scopus database**

1. Borisenko, I., Burmenko, O., Deyneko, N., Zobenko, O., Yivzhenko, Y., Kamyshentsev, G., Muraviov, V., Mykhailovska, Y., Khrystych, V., Kryvonis, S. Development of a method for producing effective solar elements CdS/CdTe/Cu/Au on a flexible substrate designed for backup supplying systems prevention of



emergency situations. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 6/5, no. 114. P. 6–11. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.247720

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.247720

2. Zobenko, O.; Loboichenko, V.; Lutsenko, Y.; Pidhornyy, M.; Zemlianskyi, O.; Hrushovinchuk, O.; Blyashenko, O.; Servatyuk, V. Study of the Features of the Protection of Energy System Elements Caused by Excessive Local Heating. *Water and Energy International*. 2023. Vol. 65r, no. 10. P. 34–40.

<https://indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:wei&volume=65r&issue=10&article=005>

### **Utility model patent**

1. Electrical outlet with thermal protection and light indicators: pat. 147146 Ukraine: H02H 5/04 (2006.01). № u 2020 07858; declared. 09.12.2020; publ. 14.04.2021, Bul. № 15. 3 s.

<https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=275533&chapter=description>

### **Materials of scientific and practical conferences certifying the approval of the dissertation**

1. Stanko D.A., Zobenko A.A. Fire prevention in places of detachable connections. The science of civil protection as a way of becoming young scientists: theses additional. participants of the All-Ukrainian Science and Practice. conf. cadets and students, Cherkasy, May 13, 2021/Cherkasy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chernobyl NUCPU of Ukraine, 2021. S. 63-64.

<https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2021/8.pdf>

2. Sototskaya S. O., Nosova D. A., Zobenko O. O., Zemlyansky O. M. Improving the safety of electrical outlets through the use of temperature protection: materials of the X All-Ukrainian Scientific and Practical Conference with International Participation, Cherkasy, 29-30 Oct. 2020/Cherkasy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chernobyl, 2020. P. 224.

<https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2020/1/1.pdf>

3. Zobenko Oleksand. Determination of features of temperature fuses application in detachable connections. Technical sciences scientific bases of modern investigations, c.244.

<https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2022/02/SCIENTIFIC-BASES-OF-MODERN-INVESTIGATIONS.pdf>

4. Zobenko Oleksandr, Zemlianskiy Oleh, Myroshnyk Oleh. Increasing the efficiency of fire protection of electrical network switching apparatus. Technical sciences science, development and the latest development trends, C. 381

<https://books.google.com.ua/books/publisher/content?id=hDiKEAAAQBAJ&hl=uk&pg=PA381&img=1&zoom=3&sig=ACfU3U2mFNVcgOOPqJtzipXwX43VN7oyQWw&w=1280>

5. Alexander Zobenko, Oleg Zemlyansky. Mathematical model of fire protection of electrical networks in places of switching during local overheating: materials of the International Scientific and Practical Conference "Fire safety issues 2022," Kharkiv, 2022/National University of Civil Protection of Ukraine. Kharkiv, 2022. P. 18.

<http://fsi.nuczu.edu.ua/FSI-2022-collection-2.pdf>

6. A.A. Zobenko, A.N. Zemlyansky, A.N. Miroshnik. Improving the Efficiency of Fire Protection of Electrical Network Switching Devices: Materials of the XII All-Ukrainian Scientific and Practical Conference with International Participation "Emergencies: Safety and Security," Cherkasy, 27-28 Oct. 2022/Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of NUCPU of Ukraine, 2022. P. 96.

<https://chipb.dsns.gov.ua/upload/1/5/1/1/8/0/1/gTG4Mzjniuitb9Waoili99FDDQUI4FF3CEp78K5A.pdf>

7. A.A. Zobenko, A.N. Zemlyansky. Physical model of fire protection of electrical networks in places of local overheating: materials of the II All-Ukrainian Scientific Conference of Students and Young Scientists "Scientific Achievements

and Discoveries of Modern Youth," Lutsk, 31 May 2023/State. higher education institution "Donetsk National Technical University." Lutsk, 2023. P. 174-176.

[https://donntu.edu.ua/wp-content/uploads/2024/03/2023\\_zbirnyk\\_naukovi-vidkryttya-suchasnoyi-molodi.pdf](https://donntu.edu.ua/wp-content/uploads/2024/03/2023_zbirnyk_naukovi-vidkryttya-suchasnoyi-molodi.pdf)

8. Zobenko O., Hvozd V., Zemlyansky O., Radutskaya D. Development of the effectiveness of fire protection of electrical networks in places of increased transient resistances. "Emergencies: Security and Protection": materials of the XIII All-Ukrainian Scientific and Practical Conference with International Participation "Emergencies: Security and Protection," Cherkasy, 26-27 Oct. 2023/Cherkasy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chernobyl NUCZ of Ukraine, 2023. P. 34.

[https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2023/Nadzvicaini\\_situaciyi\\_bezpeka\\_ta\\_zaxist.pdf](https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2023/Nadzvicaini_situaciyi_bezpeka_ta_zaxist.pdf)

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	25
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН З ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ У МІСЦЯХ КОМУТАЦІЇ НАДМІРНИХ СПОЖИВЧИХ ПОТУЖНОСТЕЙ .....	33
1.1. Аналіз шляхів підвищення протипожежного захисту споруд та електричних мереж .....	33
1.2. Аналіз шляхів формування технічного рішення елементів системи протипожежного захисту електричних мереж у провідних країнах світу .....	48
1.3. Постановка задачі дослідження .....	62
Висновки до першого розділу .....	63
РОЗДІЛ 2 СТРУКТУРНО-ЛОГІЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕМЕНТУ СИСТЕМИ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ У МІСЦЯХ КОМУТАЦІЇ НАДМІРНИХ СПОЖИВЧИХ ПОТУЖНОСТЕЙ ....	64
2.1. Аналіз причини виникнення пожеж та шляхи підвищення пожежної безпеки електричних розеток .....	64
2.2. Структурно-логічна модель елементу системи протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей .....	80
Висновки до другого розділу.....	83
РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ У МІСЦЯХ КОМУТАЦІЇ НАДМІРНИХ СПОЖИВЧИХ ПОТУЖНОСТЕЙ .....	85

3.1. Дослідження поля формування математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей .....	85
3.2. Розв’язування окремої задачі математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей з визначення перехідних процесів під час короткого замикання.....	90
3.2.1. Визначення основних характеристик математичної моделі в умовах настання аварійного режиму у віддалених точках системи електропостачання. ....	90
3.2.2. Визначення основних характеристик математичної моделі в умовах настання короткого замикання в усталеному аварійному режимі. ....	97
3.2.3. Визначення основних характеристик математичної моделі в умовах комплексного навантаження з підживленням місця аварійного режиму. ....	101
3.3. Розв’язування окремої задачі математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей з визначення розрахунку струмів короткого замикання.....	103
3.4. Розв’язування окремої задачі математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей з визначення температури та часу спрацювання плавкого запобіжника .....	109
3.4.1 Розрахунок початкових значень періодичних складових параметрів режиму. ....	109
3.4.2. Розрахунок параметрів режиму за аварійного режиму. ....	110
3.4.3 Розрахунок струму за несиметричних КЗ. ....	112

3.4.4. Розрахунок струму за аварійного режиму роботи методом спрямлених характеристик. ....	115
3.5. Опис математичної моделі. ....	116
Висновки до третього розділу .....	118
<b>РОЗДІЛ 4 ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕМЕНТУ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ У МІСЦЯХ КОМУТАЦІЇ НАДМІРНИХ СПОЖИВЧИХ ПОТУЖНОСТЕЙ .....</b>	<b>121</b>
4.1. Визначення основних підходів до розроблення фізичної моделі елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей.....	121
4.2. Інтеграція математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей у фізичну модель елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей.....	124
4.3. Опис фізичної моделі елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей .....	127
Висновки до четвертого розділу.....	131
<b>РОЗДІЛ 5 ПЕРЕВІРКА ДОСТОВІРНОСТІ РОЗРОБЛЕНИХ МОДЕЛЕЙ та Варіанти впровадження розроблених моделей протипожежного захисту.....</b>	<b>133</b>
5.1. Опис лабораторної установки й методики проведення експериментів з її використанням .....	133
5.2. Результати експериментів, виконаних із використанням лабораторної установки .....	138

5.2.1. Перша серія експериментів з елементом електричного навантаження зі справним контактним з'єднанням розетки та задовільним штепселем.....	143
5.2.2. Друга серія експериментів з елементом електричного навантаження з окисленим штепселем та справним контактним з'єднанням розетки. ....	145
5.2.3. Третя серія експериментів з елементом електричного навантаження із задовільним штепселем та розігнутими контактними з'єднаннями розетки. ....	147
5.2.4. Четверта серія експериментів з елементом електричного навантаження з окисленим штепселем та розігнутими контактними з'єднаннями розетки .....	149
5.2.5. П'ята серія експериментів з елементом електричного навантаження розетки із захистом та задовільним штепселем. ....	151
5.2.6. Шоста серія експериментів з елементом електричного навантаження розетки із захистом та окисленим штепселем. ....	153
5.2.8. Восьма серія експериментів з елементом електричного навантаження розетки з тепловим захистом та розігнутим контактом і окисленим штепселем. ....	157
5.3. Варіанти впровадження розроблених моделей протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей .....	160
Висновки до п'ятого розділу .....	162
ВИСНОВКИ .....	164
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	167
ДОДАТОК .....	180

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

ЄС	Європейська спільнота
НС	надзвичайна ситуація
СЕП	Система електропостачання
ТП	Трансформаторна підстанція
ЕРС	Електрорушійна сила
АРЗ	Автоматичне регулювання збудження
ЛЕП	Лінії електропередач
КЗ	Коротке замикання



## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Пожежі від електроустановок унаслідок виникнення коротких замикань, струмових перевантажень, перегріву місць з'єднань із великими перехідними опорами тощо мають тенденцію до зростання. Для мінімізації прояву негативних наслідків коротких замикань та перевантажень електричні мережі обладнуються відповідними апаратами захисту, як-от: запобіжники, автоматичні вимикачі, теплові реле тощо.

Водночас попередження пожеж, які виникли через великі перехідні опори, переважно здійснюють за рахунок проведення оглядів та профілактичних заходів. Наявність великого перехідного опору в місці комутації призводить до надмірного локального нагрівання, крім цього не відбувається значних змін контрольованих характеристик електричного струму в колі, через які б спрацьовували апарати захисту.

Подальшим розвитком запропонованого підходу слугують наукові дослідження Т. Mastouri, J.L. Wybo, Н. Xiao, I. Kelman, O.David, М.І. Бадюка, П.Б. Волянського, Гур'єва С.О., Г.Г. Онищенко, В.С. Тарасюка, Р.І. Шевченка. Утім акцентовані в них аспекти залишили поза увагою проблему розроблення сучасного елемента протипожежного захисту електричних мереж, які функціонують в умовах надмірного локального нагріву.

Відтак проведений аналіз статистики пожеж в Україні, що виникають від джерел запалення електричного походження, демонструє стійку тенденцію до збереження їх кількості. Незважаючи на розвиток сучасних апаратів захисту, електричні розетки залишаються одним із місць, де внаслідок виникнення великого перехідного опору можуть відбуватися значні тепловиділення. Підвищення температури штепсельного з'єднання спричиняє самозаймання деталей розеток та оздоблювальних матеріалів.

Саме тому вдосконалення способів виявлення та попередження пожежонебезпечних режимів роботи електрообладнання, особливо через виникнення великих перехідних опорів, залишається актуальною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**  
Дисертація на здобуття наукового ступення доктора філософії виконана відповідно до «Переліку пріоритетних напрямів наукових досліджень і науково технічних розробок Черкаського інститута пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України на 2020-2024 роки» та в рамках науково-дослідної роботи «Підвищення ефективності попередження пожеж від великих перехідних опорів в електричних мережах» (номер державної реєстрації - 0124U000894).

**Мета і завдання дослідження.**

Мета роботи – підвищення ефективності протипожежного захисту електричних мереж, які функціонують в умовах надмірного локального нагріву, за рахунок розроблення елемента (розеткового модуля) із вбудованим температурним запобіжником.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі наукові завдання.

1. Проаналізувати сучасний стан з підвищення ефективності протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей.

2. Розробити структурно-логічну модель елемента системи протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей.

3. Розробити математичну модель протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей.

4. Розробити фізичну модель елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей.

5. Перевірити достовірність розроблених моделей та висунути пропозиції з упровадження розроблених моделей.

**Об'єкт дослідження:** процеси підвищення ефективності протипожежного захисту електричних мереж.

**Предмет дослідження:** параметри протипожежного захисту елементів електричних мереж у місцях комутації, які обумовлені надмірним локальним нагрівом.

**Методи дослідження.** У дисертаційній роботі для розроблення моделей застосовано методи системного, структурного, функціонального і математичного аналізу, теорії математичної статистики; для оцінки ефективності математичного моделювання та достовірності отриманих результатів і сформульованих висновків – теорія ймовірностей, метод морфологічного аналізу, методи планування наукових експериментів і обробки їх результатів.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У роботі вирішено важливе науково-технічне завдання у сфері пожежної безпеки. Запропоновано шляхи підвищення ефективності протипожежного захисту електричних мереж в умовах надмірного локального нагріву в місцях комутації надмірних споживчих потужностей, що забезпечує мінімізацію наслідків загоряння та запобігає подальшому розвитку пожежі.

У процесі виконання роботи вперше отримані такі наукові результати.

1. Розроблено структурно-логічну модель елемента системи протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей, що складається з двох контурів управління процесом протипожежного захисту: контуру управління в умовах достатності наявного протипожежного захисту (достатнього) та контуру управління процесом протипожежного захисту в умовах комутації надмірних споживчих потужностей (інноваційного), який функціонує в разі встановлення факту наявності обмежень достатності протипожежного захисту. Він складається з

восьми блоків, а саме: розроблення нових нормативно-правових актів; створення інноваційних технічних засобів захисту; розв'язування окремої задачі визначення перехідних процесів під час короткого замикання; розв'язування окремої задачі величини струмів короткого замикання; розв'язування окремої задачі щодо визначення температури та часу спрацювання плавкого запобіжника; формування математичної моделі попередження пожежі; формування методики попередження пожежі за рахунок інноваційного технічного засобу захисту; формування управлінських рішень щодо заходів безпеки об'єкту захисту.

2. Розроблено математичну модель протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей, яка являє собою систему з двох аналітичних залежностей. Перша описує залежність основних параметрів елементу системи протипожежного захисту від основних параметрів електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей. Друга дозволяє визначити ефективні параметри елементу системи протипожежного захисту залежно від варіантів розв'язування окремих задач: з визначення перехідних процесів під час короткого замикання; з визначення розрахунку струмів короткого замикання; з визначення температури та часу спрацювання плавкого запобіжника.

3. Розроблено фізичну модель елементу протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей, яка спирається на процес розмикання електричного кола під час перегрівання з'єднання в місцях надмірних споживчих потужностей за умови постійної візуалізації світлової індикації працездатності чи спрацювання теплового запобіжника елементу протипожежного захисту.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в запобіганні пожежам та НС, пов'язаним із загорянням обладнання електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей, зокрема в мінімізації наслідків загоряння та унеможливленні подальшого розвитку пожежі.

Пропонується розроблені структурно-логічну, математичну та фізичну моделі впровадити у вигляді сучасної електричної розетки з температурними запобіжниками, які спрацювуватимуть у разі перевищення допустимої температури з'єднання й припинять подальше нагрівання шляхом розмикання електричного кола. Остання може використовуватися в усіх наявних вітчизняних системах протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей.

Основні результати дослідження були впроваджені в навчальний процес Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України (акт впровадження від 25.04.2024), Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту (акт впровадження від 11.04.2024), Черкаська філія Зовнішньоекономічна асоціація «Новосвіт» (акт впровадження від 08.05.2024), ТОВ «Спецзахист - АСПС» (акт впровадження від 02.05.2024), Дослідно випробувальна лабораторія аварійно-рятувального загону спеціального призначення ГУ ДСНС України у Черкаській області (акт впровадження від 05.03.2024)

**Особистий внесок здобувача.** Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати отримано здобувачем самостійно. Наукові положення, що виносяться на захист, та висновки дисертації належать автору.

У роботах, які опубліковано у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в наступному:

- у науковій праці «Розроблення розеточного модуля електричної мережі» здобувачем було запропоновано частину математичної моделі, що стосувалася вибору елемента протипожежного захисту [115];

- у науковій праці «Development of a method for producing effective solar elements CdS/CdTe/Cu/Au on a flexible substrate designed for backup supplying systems prevention of emergency situations» здобувач здійснив аналіз літературних джерел, та визначив закономірності стосовно впливу

перехідних опорів на параметри роботи елементів системи резервного живлення [119];

- у науковій праці «Study of the Features of the Protection of Energy System Elements Caused by Excessive Local Heating» здобувачем було висвітлено планування експериментів та обладнання, що використовувалося для проведення дослідження, результати експериментів та їх обробка [120].

**Особистий внесок кожного автора.** У роботах, які опубліковано у співавторстві, особистий внесок кожного автора полягає в наступному:

- в науковій праці «Розроблення розеточного модуля електричної мережі» [115].

автором Землянським О.М. взято участь в постановці проблеми та розробленні розеточного модуля електричної мережі;

автором Мирошником О.М. взято участь у проведенні аналізу існуючих способів підвищення ефективності протипожежного захисту електричних мереж;

автором Лесечком Д.В. проведено літературний огляд за напрямом дослідження.

- в науковій праці «Development of a method for producing effective solar elements CdS/CdTe/Cu/Au on a flexible substrate designed for backup supplying systems prevention of emergency situations» [119].

автором Борисенко І. розроблена методика проведення досліду, взято участь у проведенні експериментальних досліджень;

автором Бурменко О. проведено математичні розрахунки, взято участь у проведенні експериментальних досліджень;

автором Дейнеко Н. проведено графічне моделювання результатів дослідження, взято участь у проведенні експериментальних досліджень;

автором Ювженко Ю. проаналізовано літературні джерела;

автором Камишенцем Г. визначено проблематику завдання;

автором Муравйовим В. запропоновано пропозиції щодо удосконалення моделей сонячних елементів, взято участь у проведенні експериментальних досліджень.

автором Михайловською Ю. проаналізовано вимоги до європейських стандартів, взято участь у проведенні експериментальних досліджень;

автором Христичем В. вивчено особливості даної теми, взято участь у проведенні експериментальних досліджень;

автором Кривоніс С. розробив експериментальну установку для проведення дослідів, взято участь у проведенні експериментальних досліджень.

- в науковій праці «Study of the Features of the Protection of Energy System Elements Caused by Excessive Local Heating» [120].

автором Лобойченко В. проведено аналіз проблематики дослідження, взято участь у проведенні експериментальних досліджень;

автором Луценко Ю. взято участь у обробці результатів дослідження;

автором Підгорним М. визначено проблематику завдання;

автором Землянським О. запропоновано методику проведення експерименту, взято участь у виготовленні експериментальної установки та проведенні досліджень;

автором Грушовінчуком О. взято участь у проведенні експериментальних досліджень;

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертації доповідались, обговорювались та отримали схвалення на науково-практичних конференціях: наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених: тези доповідей учасників (Всеукраїнська науково-практична конференція курсантів та студентів), (м. Черкаси, ЧПБ НУЦЗ України, 2021 р.); X Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю (м. Черкаси, ЧПБ НУЦЗ України, 2021 р.); Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference (Scientific bases of modern investigations), (

Helsinki, Finland, 2022); Proceedings of the XXXV International Scientific and Practical Conference (Science, development and the latest development trends), (Paris, France, 2022); Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми пожежної безпеки 2022» (Fire safety issues 2022.), (м. Харків, НУЦЗ України 2022 р.); XII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист», (м.Черкаси, ЧПБ НУЦЗ України, 2022 р.); Всеукраїнської наукової конференції студентів та молодих вчених (Наукові досягнення та відкриття сучасної молоді), (м. Луцьк, Донецький національний технічний університет, 2023 р.); XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю (Надзвичайні ситуації: безпека та захист), (м.Черкаси, ЧПБ НУЦЗ України, 2023 р.).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 15 праць, із них 2 статті у виданні, що входить до наукометричної бази Scopus, 4 статті у наукових фахових виданнях України категорії «Б», а також 8 тез доповідей на Міжнародних наукових конференціях та 1 патент на корисну модель.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з анотації, списку скорочень, змісту, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг роботи становить 187 сторінок друкованого тексту, з них основного тексту 159 сторінок, 40 рисунків, 11 таблиць, список використаних джерел складає 121 найменування та займає 13 сторінок, а також 1 додаток на 7 сторінок.



# РОЗДІЛ 1

## СУЧАСНИЙ СТАН З ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ У МІСЦЯХ КОМУТАЦІЇ НАДМІРНИХ СПОЖИВЧИХ ПОТУЖНОСТЕЙ

### 1.1. Аналіз шляхів підвищення протипожежного захисту споруд та електричних мереж

У сучасних системах електропостачання будівель та споруд передавання електроенергії здійснюється мережами з напругою до 1000 В незалежно від того, чи це змінний чи постійний струм. Цей процес відбувається з використанням ізольованих проводів та силових кабелів, які мають гумову або полімерну ізоляцію. Зв'язок між розподільчими пристроями та споживачами забезпечується за допомогою контактних та роз'ємних з'єднань. Кожне порушення нормальної роботи електроустановки може призвести до аварій або відмов у роботі, унаслідок чого виникають пожежі.

Основними напрямками забезпечення пожежної безпеки є усунення умов виникнення пожежі та мінімізація її наслідків. Об'єкти повинні мати системи пожежної безпеки, спрямовані на запобігання пожежі, дії на людей та матеріальні цінності небезпечних факторів пожежі, у тому числі їх вторинних проявів [1]. До таких факторів належать: полум'я та іскри; підвищена температура навколишнього середовища; токсичні продукти горіння й термічного розкладу матеріалів, речовин; дим; знижена концентрація кисню [2]. Вторинними проявами небезпечних факторів пожежі вважаються: уламки, частини зруйнованих апаратів, агрегатів, установок, конструкцій; радіоактивні та токсичні речовини й матеріали, викинуті зі зруйнованих апаратів та установок; електричний струм, пов'язаний із переходом напруги на струмопровідні елементи будівельних конструкцій,

апаратів, пошкодження ізоляції під дією високих температур; небезпечні фактори вибухів, пов'язаних із пожежами [3, 4]. Відповідно до чинних норм пожежна безпека об'єкта повинна забезпечуватися системою запобігання пожежі, системою протипожежного захисту і системою організаційно-технічних заходів [5,6].

Аварії в електричних мережах та обладнанні можуть статися через несправності обладнання, перенапругу, відмову апаратів захисту та інші причини. Забезпечення надійності системи також залежить від якості контактних та роз'ємних з'єднань, оскільки неправильний монтаж або обслуговування можуть призвести до перегрівання та короткого замикання. Для попередження аварій і забезпечення безпеки важливо дотримуватися вимог відповідних нормативних актів. Серед заходів із попередження аварій варто виділити контроль за станом ізоляції, попередження механічних пошкоджень кабелів та своєчасне обслуговування ліній електропередач. Крім того, необхідно передбачати чіткий план дій у випадку аварій, а також підготовляти персонал до НС за допомогою тренувань та навчань. Під час ліквідації аварій експлуатаційний персонал повинен мати достатні знання про схеми та розташування електрообладнання, а також дотримуватися загальних правил техніки безпеки, особливо в установках високої напруги.

Усе вище викладене підкреслює важливість системного підходу до попередження аварій в електроенергетиці. Лише за умови виконання всіх необхідних заходів та ретельного контролю можна гарантувати надійну та безпечну роботу електромереж та обладнання.

До того ж, важливою складовою безпеки є постійне оновлення технічного обладнання та застосування сучасних технологій у сфері електропостачання. Упровадження автоматизованих систем моніторингу та діагностики може допомогти вчасно виявляти потенційні проблеми та уникнути аварійних ситуацій.

На практиці, для запобігання аваріям і забезпечення безпеки електромереж, слід також удосконалювати стандарти технічного обслуговування та монтажу електрообладнання. Упровадження суворих процедур перевірки якості монтажу, а також регулярні аудити та огляди електрообладнання можуть допомогти вчасно виявляти потенційні проблеми та усунути їх до виникнення серйозних пошкоджень.

Крім того, створення ефективної системи моніторингу та контролю параметрів роботи електромережі дозволяє оперативно реагувати на будь-які відхилення в роботі системи та вчасно вживати заходи щодо їх усунення.

Потрібний рівень пожежної безпеки людей за допомогою зазначених систем не повинен бути меншим за  $0,999999$  відвернення впливу небезпечних факторів на рік із розрахунку на кожну людину, а допустимий рівень пожежної небезпеки для людей має бути не більше  $10^{-6}$  впливу небезпечних факторів пожежі, що перевищують гранично допустимі значення, на рік із розрахунку на кожну людину. Рівень забезпечення пожежної безпеки являє собою також кількісну оцінку запобігання збиткам під час можливої пожежі [7, 8].

Об'єкти, пожежі на яких можуть призвести до загибелі або масового ураження людей небезпечними факторами пожежі та їх вторинними проявами, а також до значного пошкодження матеріальних цінностей, повинні мати системи пожежної безпеки, що забезпечують мінімальну можливу ймовірність виникнення пожежі [9]. Конкретні значення такої ймовірності визначаються проєктувальниками та технологами. Незважаючи на те, що за останні 9-10 років у світі намітилась тенденція до зниження кількості пожеж, у цілому ця проблема залишається дуже актуальною. Наприклад, у порівнянні з періодом середини 80-х років середньо статистична річна кількість пожеж у країнах ЄС сьогодні майже втричі вища й коливається в межах 40000-50000. Чисельність загиблих становить 2500-3500 людей на рік, серед них 120-150 дітей [10, 11]. Щодня в країнах ЄС

виникає, у середньому, приблизно 130 пожеж, на яких гине 7-10, отримує травми 140-150 людей. Збитки від пожеж складають понад 2,0 млрд грн на рік [12].

Саме тому важливо проводити систематичні перевірки та огляди всього електрообладнання з метою виявлення можливих проблем та їх усунення до виникнення аварійних ситуацій. Це може включати в себе перевірку стану ізоляції, контроль за роботою захисних пристроїв та систем автоматичного відключення в разі несправності. Саме тому залучення до роботи експертів з електробезпеки та проведення аудитів безпеки електроустановок може допомогти ідентифікувати потенційні ризики та дозволить розробити ефективні заходи з їх усунення. Додатковим важливим аспектом є постійне вдосконалення та модернізація наявних електромереж і обладнання, що включає в себе заміну застарілого обладнання на більш ефективне та безпечне, а також упровадження новітніх технологій, які дозволять забезпечити більшу надійність та безпечність роботи системи електропостачання. У цілому комбінація цих заходів дозволяє підвищити рівень безпеки електромереж та запобігти виникненню аварій, що має велике практичне значення для забезпечення надійного та безпечного електропостачання для всіх споживачів.

У всіх елементах електричного кола відбувається перетворення енергії, тобто елементи кола мають опір спрямованому руху носіїв заряду. З кількісного боку це явище характеризує величина, зворотна провідності, яка називається опором. Як відомо, залежність між напругою і струмом установлює Закон Ома. Ця залежність, як правило, має лінійний характер. Коефіцієнт пропорційності між напругою на кінцях як провідника, так і струму, що проходить крізь нього, визначається питомою провідністю матеріалу й геометричними розмірами провідника. У провідникових і кабельних виробках для виготовлення обмоток катушок, електричних машин, трансформаторів широко використовуються метали з малим питомим

опором. У разі підвищення температури провідника посилюється тепловий хаотичний рух частинок, що збільшує кількість зіткнень й ускладнює упорядкований рух електронів. Цим пояснюється збільшення питомого електричного опору металів зі зростанням температури.

Найпростіше електричне коло складається з трьох основних елементів: джерела електричної енергії, навантаження або приймачів електричної енергії, з'єднувальних проводів. Крім основних, до складу електричних кіл входять різні допоміжні елементи для керування, захисту, регулювання, контролю тощо. Допоміжні елементи, як і основні, вмикаються в коло за допомогою з'єднувальних проводів.

Одним із видів перетворення електричної енергії або енергії електричного струму в інші види енергії є перехід у теплову енергію. Це перетворення електричної енергії в теплову або «теплова дія струму» відкрито незалежно фізиками Е. Ленцем і Д. Джоулем. Сутність теплової дії струму й кількісний бік явища сформульовані у відомому законі Джоуля-Ленца.

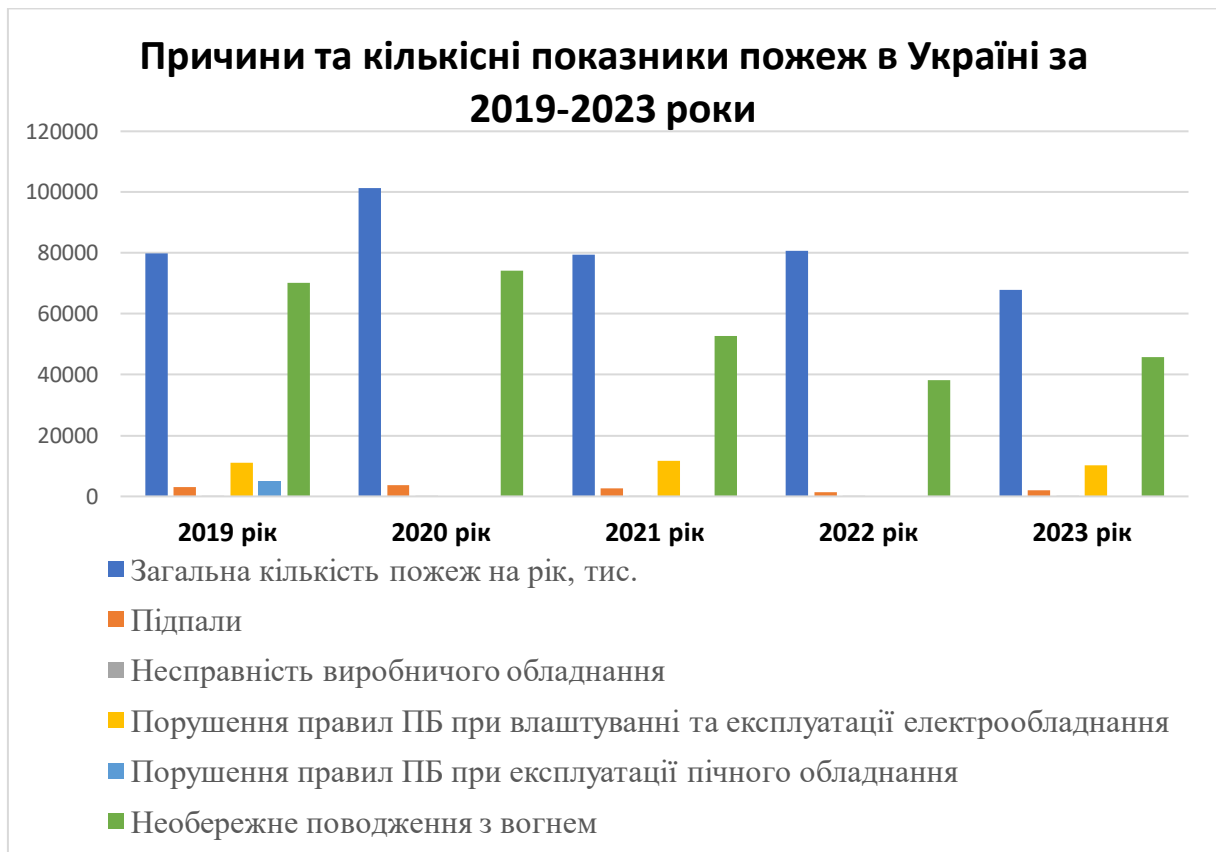
Закон Джоуля-Ленца має величезне значення для практичного застосування тією категорією працівників, які відповідають за пожежний стан як на виробництві, так і в побуті.

Знання та розуміння сутності нагрівання провідників струмом дають можливість залежно від конкретної структури електричної мережі чи електроустановки визначити найбільш пожежонебезпечні ділянки електричного кола, у яких проходять значні за силою електричні струми, що виділяють велику кількість теплоти й здатні створити джерело запалювання. Такий аналіз дає можливість вчасно реагувати на виникнення можливої пожежі та застосовувати відповідні протипожежні заходи.

Теплову дію струму під час експлуатації електричного обладнання й силових мереж слід розглядати за двох умов: перша – це корисне практичне використання у сфері людської діяльності в (промисловому та

сільськогосподарському виробництвах, в побуті та інших галузях господарювання); друга – некорисна, непередбачувана, шкідлива, що призводить до виникнення пожеж або вибухонебезпечної ситуації.

Причини та кількісні показники пожеж в Україні за 2019-2023 рік наведено на Рисунку 1.1.



**Рисунок 1.1. Причини та кількісні показники пожеж в Україні**

Серед причин виникнення пожеж основними є [13-15]:

- порушення техніки безпеки влаштування та обслуговування систем опалення, вентиляції; правила збереження й використання пожежонебезпечних речовин і матеріалів;
- невиконання протипожежних норм і заходів; паління;
- неправильне поводження з вогнем (смолоскипи, паяльні лампи, свічки; паління);

- несправність електромережі (коротке замикання; перевантаження електромережі; порушення правил використання електроустаткування й приладів);

- підпали.

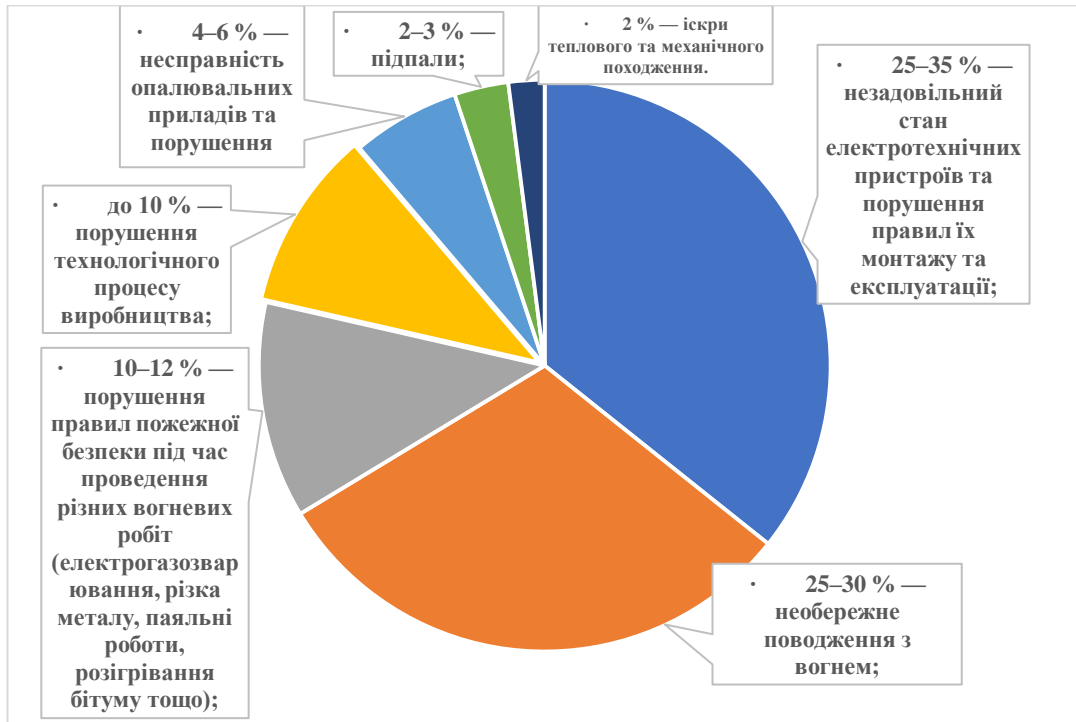
Пожежна небезпека електропроводок характеризується трьома основними пожежонебезпечними проявами струму:

- здатністю самої електропроводки за певних аварійних ситуацій (коротке замикання, перевантаження тощо) стати джерелом пожежі (займання особистої ізоляції з подальшим загорянням підтримувальних конструктивних елементів та навколишніх: проводки, горючих матеріалів і речовин);

- здатністю ізоляції проводів розповсюджувати горіння в разі запалюванні від сторонніх джерел;

- здатністю утворювати в момент короткого замикання розплавлені частинки провідникових елементів, нагрітих пожежонебезпечними режимами роботи електричних мереж до температури понад 1000°C, які, розлітаючись у різні боки, створюють потенційні джерела запалювання.

Статистичні дані основних причин пожеж на промислових підприємствах зображено на Рисунку 1.2.



**Рисунок 1.2. Статистичними дані основних причин пожеж на промислових підприємствах**

Як бачимо, пожежі, що виникають через несправність і порушення правил експлуатації електротехнічних, електронагрівальних приладів, пристроїв та устаткувань, а саме через виникнення коротких замикань, перевантаження електродвигунів, освітлювальних та силових мереж унаслідок великих місцевих опорів, роботу несправних або залишених без нагляду електроприладів, складають понад 25% від усіх випадків [16].

Короткі замикання утворюються внаслідок порушення (пошкодження) ізоляції струмопровідних елементів мережі. У місці пошкодження чи руйнування ізоляції відбувається з'єднання фаз мережі між собою на нейтральний провід або на землю. У мережах, у яких нейтральний провід джерела живлення з'єднуються із землею можливі міжфазні й однофазні КЗ. Режим однофазного КЗ утворюється, якщо порушується ізоляція між будь-якою фазою й землею або нульовим проводом. У мережах



напругою 380/220В такі короткі замикання складають приблизно 65% від загальної кількості замикань.

Різде збільшення в короткозамкненому колі струму відповідно призводить до збільшення в квадратичній залежності його термічної й динамічної дії. Так, наприклад, якщо струм пожежонебезпечного режиму роботи електричних мереж порівняно з нормальним режимом підвищився в 10 разів, то електродинамічні зусилля між струмопровідними частинами й виділення теплоти в них збільшиатся в 100 разів.

Однофазні КЗ можуть утворювати так звані неповнофазні режими, за яких у трифазному колі перегоряє запобіжник в одній із фаз у разі обриву одного проводу або порушення контакту одного з полюсів магнітного пускача чи автомата. Такі режими дуже небезпечні для трифазних двигунів. Неповнофазний режим утворюється найчастіше після перегорання в одній фазі запобіжника, який спрацював вимикаючи однофазне коротке замикання. Через це основним заходом для запобігання неповнофазних режимів роботи електродвигунів слід вважати використання трифазних захисних апаратів у силових колах. Якщо між виводами джерела живлення й затискачами електродвигуна використовуються тільки трифазні захисні апарати, то вимикання однофазного КЗ, що виникло в мережі, яка з'єднує джерело з електродвигуном, відбувається в усіх трьох фазах. Іншими словами, під час спрацювання трифазних апаратів захисту неповнофазний режим не утворюється.

За двофазного замикання фази з'єднуються між собою без контакту із землею.

За двофазного замикання на землю фази з'єднуються між собою через землю. У системах з ізольованою нейтраллю це замикання аналогічно простому двофазному.

За трифазного замикання всі три фази з'єднуються між собою. Трифазні короткі виникають значно менше за інших (близько 10%). Проте,

як свідчить практика, трифазні КЗ викликають більш тяжкі наслідки, а тому є найбільш небезпечними. Отже, за пожежонебезпечних режимів роботи електричних мереж величина струмів, що протікають провідниками й струмопровідними частинами апаратів і машин, досягають дуже високих значень і утворюють великі електродинамічні сили, які руйнують електричні ізоляційні та металеві підтримувальні конструкції, а теплова дія дуги, що виникає за пожежонебезпечних режимів роботи електричних мереж, плавить металеві конструкції, які займаються і горять.

Таким чином, під час пожежонебезпечних режимів роботи електричних мереж джерелами запалювання є електрична дуга, бризки розплавленого металу та сам нагрітий провід. Від цих джерел запалювання займається горюча ізоляція та інші деталі й конструкції електроустановок, а також навколишнє середовище.

Разом зі зростанням потужності електроустановок і пристроїв збільшується й сила струму. Правильне налагодження й використання швидкодіючих апаратів захисту не дозволяє струмам досягти максимальних значень за короткого замикання. Але, як свідчить практика, у виробничих приміщеннях з підвищеною вологістю повітря або за наявності дисперсного пилу пожежонебезпечні режими роботи електричних мереж виникають у найнепередбачуваніших умовах і ситуаціях. Отже, найбільш ефективними заходами запобігання пожежонебезпечним режимам роботи електричних мереж є своєчасний і регулярний профілактичний огляд та ремонт електрообладнання, перевірка стану ізоляції струмопровідних частин.

Слід також відмітити, що, крім термічного й електродинамічного ефектів, за пожежонебезпечних режимів роботи електричних мереж відбувається різкий спад мережевої напруги, котра може стати причиною часткового або повного порушення електропостачання споживачів.

Якщо спад напруги в мережі під час короткого замикання невеликий і джерело живлення не вимкнулось апаратами захисту, то електродвигуни

будуть продовжувати працювати, але з меншою частотою обертання. За умови значного зниження напруги обертовий момент двигуна може виявитися недостатнім, щоб обертати навантаження, і він зупиниться (перейде в режим пуску або в режим короткого замикання).

На деяких виробництвах зменшення частоти обертання електродвигунів або їх зупинка може призвести до порушення всього технологічного процесу, псування продукції, пожежі або вибуху.

Так, наприклад, на нафтопереробних заводах, хімічних та інших підприємствах, що виробляють мінеральні добрива, багато процесів пов'язано з інтенсивним охолодженням проміжного або кінцевого продукту. Зупинка електродвигунів насосів або зменшення їх частоти обертання може призвести до припинення або зменшення подачі холодоагенту в теплообмінні апарати. Унаслідок цього температура і, відповідно, тиск усередині установки різко підвищиться, що може спричинити вибух і пожежі.

Ще одним не менш небезпечним явищем виникнення пожеж в електричних мережах і установках напругою 380/220В є струмові перевантаження.

Розрізняють перевантаження нормальні та аварійні. Перші виникають у ході нормальної експлуатації електроустановок трифазного струму й не призводять до небезпечних наслідків. Такими перевантаженнями, наприклад, є пускові струми асинхронних двигунів. Аварійні перевантаження виникають із різних причин. Найбільш розповсюдженою є підключення нових непередбачених навантажень, що призводить до збільшення струму на окремих ділянках кола вище допустимого, а також перевантаження двигунів за технологічним режимом (рідше аварійних).

Ще одна причина перевантажень, що спостерігається на практиці, – неправильне виконання захисту від коротких замикань і перевантажень. Загрублення захисту, використання захисних апаратів, які не реагують на

аварійні режими у мережі, установка в запобіжниках некаліброваних плавких вставок, а іноді й простих дротяних перемичок, призводять до відмови захисту під час виникнення в мережі КЗ, особливо однофазних, за яких струми іноді не дуже перебільшують робочі. Тривало протікаючи, вони утворюють небезпечні перевантаження для струмоприймачів.

Для запобігання перевантаженням, крім дотримання вимог нормативно-технічних документів щодо улаштування й вибору елементів електричних кіл та мереж, необхідний регулярний контроль струмових навантажень. Він може бути постійним або тимчасовим, перевірочним. Постійний контроль здійснюється контрольно-вимірювальними приладами, що змонтовані на панелях розподільчих щитів. У міру необхідності величину струму можна вимірювати за допомогою струмовимірювальних кліщів або ж за допомогою розрахунків, якщо відомі величини елементів, якими протікає струм. У разі виявлення перевантажень необхідно терміново вжити відповідних заходів щодо розвантаження електроустановки чи мережі до номінальних значень струмів і напруг.

Перехідні опори, які з'являються там, де з'єднуються проводи, кабелі, шини, прилади керування та захисту, а також ву ковзних контактах електричних машин, можуть призвести до аварійних ситуацій і, відповідно, до виникнення пожеж. Пошкодження струмоведучих частин та пожежі, спричинені великими перехідними опорами, трапляються не менш часто, ніж від перевантажень. На виробництві ці події відбуваються набагато частіше, ніж у побуті, оскільки тут існує велика кількість контактних з'єднань.

Зазвичай на практиці великі перехідні опори виникають у таких місцях:

- з'єднанні провідників із різнорідних матеріалів, як-от: мідь-алюміній, алюміній-залізо. Із часом алюміній може втрачати пружність, що призводить до послаблення контакту, його нагрівання, окислення та утворення великого перехідного опору;

- під час виконання неякісних скруток жил проводів у мережах, розгалужувальних коробках та інших з'єднаннях, виконаних тимчасово та залишених на постійній основі;

- за наявності ковзних з'єднань у пристроях та приладах, робочих контактах магнітних контакторів, пускачів, контролерів, теплових реле, плавких запобіжників, штепсельних розеток, патронів тощо;

- унаслідок впливу хімічно активного навколишнього середовища, такого як пара, волога, кислоти, луги та підвищена температура.

Також природне зношування контактуючих поверхонь відбувається через окислення металів (корозію), а з часом метал у з'єднаннях стає втомленим, що призводить до послаблення сили взаємного притискання контактів.

Для запобігання нагріванню від великих перехідних опорів та уникнення пожежі важливо ретельно виконувати попереджувально-планові ремонти й огляди електрообладнання. Під час цих заходів варто виконувати дрібний і поточний ремонти апаратів захисту та керування, а також підтягувати контакти у з'єднаннях. Тож особливу увагу слід звертати на з'єднання струмоведучих частин між собою та їх підключення до клем машин і апаратів.

Серед електричних апаратів значну пожежну небезпеку становлять прилади з рухомими контактами. Пожежна небезпека пояснюється надмірним підвищенням температури деталей апарату, яке відбувається в результаті міжвиткових замикань у котушках апаратів, послаблення контактних з'єднань, забруднення контактних поверхонь. Перегрівання котушки призводить до збільшення активного опору проводу котушки, зменшення струму й сили, що притягує осердя електромагніту, що у свою чергу збільшує повітряний зазор між якорем і осердям і спричиняє ще більше перегрівання котушки, призводить до займання ізоляції її обмотки. На практиці доведено, що причиною значного перегрівання котушки може бути

навіть незначне збільшення (на 5% вище номінального значення) напруги. Перегрівання силових контактів магнітних пускачів може відбутися під час роботи в неоптимальному режимі, унаслідок короткого замикання, а також через їх знос. Якщо такі контакти своєчасно не замінити, то вони можуть приваритися один до одного, що призведе до повного виходу із ладу пускача.

Нерідко пожежі від пускорегулювальної апаратури виникають у результаті коротких замикань проводів на корпус у містах їх вводу, а також унаслідок міжвиткових замикань котушок магнітних пускачів. На електричну і механічну міцність елементів електропроводу і котушок впливають механічні дії у вигляді вібрацій і струсів, які визивають руйнуючі механічні напруження в деталях. Таким чином, у будь-якому електричному апараті кремлі вузли й деталі зношуються та виходять із ладу. Виникають порушення регулювання, послаблюються контактні з'єднання, відбувається природне старіння ізоляції тощо. Усе це за впливу певних факторів може призвести до пожежі.

Усе вищесказане дозволяє говорити про те, що пожежі є джерелом підвищеної небезпеки для людини й навколишнього середовища [17,18]. Для зменшення травматизму на пожежах необхідно створити системи безпеки людей під час пожежі [19, 20].

Найбільш надійним способом попередження пожеж є застосування пожежної сигналізації та автоматичних засобів захисту. Пожежні сповіщувачі перетворюють неелектричні фізичні величини (теплову і світлову енергію, рух диму) на електричні й передають ці сигнали на приймальний пристрій [20-23]. У цілому, поєднання цих заходів дозволить підвищити рівень безпеки електромереж та забезпечити надійне та стабільне електропостачання для всіх користувачів.

Таким чином, проведений аналіз шляхів підвищення протипожежного захисту споруд та електричних мереж показує стійку тенденцію до збереження кількості пожеж від джерел запалення електричного походження.

Незважаючи на розвиток сучасних апаратів захисту, електричні розетки залишаються одним із місць, де внаслідок виникнення великого перехідного опору можуть відбуватися значні тепловиділення. Підвищення температури штепсельного з'єднання може стати причиною самозаймання деталей розеток та оздоблювальних матеріалів, тому існує необхідність пошуку та впровадженні рішень із попередження аварій, які допоможуть забезпечити стабільне та безпечне електропостачання для всіх користувачів.

## **1.2. Аналіз шляхів формування технічного рішення елементів системи протипожежного захисту електричних мереж у провідних країнах світу**

Системи електропостачання є одними з найскладніших інженерних систем. Вони характеризуються високою швидкістю реакції різних фізичних процесів, складністю накопичення електричної енергії в промислових масштабах та необхідністю застосування автоматичного обладнання для управління системою [24]. В умовах безперервного будівництва та введення в експлуатацію нових об'єктів в ЄС та країнах Європи, які розвиваються, відбувається безперервний розвиток електроенергетичного комплексу, що, у свою чергу, викликає впровадження нової електромережі та генеруючого обладнання [25-27].

Упровадження нового обладнання також спричинене заходами підвищення загальної безпеки загальносвітової енергосистеми. Нові потужності та введення в експлуатацію нового обладнання позитивно впливають на роботу електроенергетичної системи, а саме:

- знижують навантаження на обладнання електромережі,
- підвищують статичну та динамічну стійкість,
- підвищують надійність енергосистеми,
- підвищують мінливість розподілу активної потужності між генеруючим обладнанням, що працює в декількох режимах, і вибором конфігурації підключеного генеруючого обладнання [28-31].

З іншого боку, будівництво електромережі та введення в експлуатацію нових об'єктів призводять до ускладнення електромагнітних перехідних процесів в аварійних умовах та збільшення кількості джерел струму в умовах КЗ, що також причиною збільшення сумарного струму КЗ в місці несправності [32, 33]. Крім того, введення в експлуатацію об'єктів нового покоління призводить до встановлення нових підвищувальних



трансформаторів із заземленою нейтраллю, як наслідок, підвищується рівень струмів однофазних електромереж за рахунок загального зниження опору нульової послідовності [34]. Проблема збільшення струмів КЗ безпосередньо відбивається на надійності, режимах роботи та функціональному стані силових вимикачів, які поряд із силовими трансформаторами є одним із найбільш відповідальних видів енергетичного обладнання [35, 36].

За орієнтовною оцінкою, в європейських країнах, які розвиваються, експлуатується близько 30 тис. вимикачів напруги від 110 до 750 кВ, а конкретно розподіл за видами напруги такий: 110 кВ – 80,5%, 220 кВ – 15,2%, 330 кВ – 1,2%, 500 кВ – 3%, 750 кВ – 0,1%. Переважну більшість (54%) складають масляні вимикачі з глухим резервуаром номінальною напругою 110 і 220 кВ. На масляні вимикачі з мертвої ємності припадає 58% серед вимикачів на 110 кВ і 45% серед вимикачів на 220 кВ [38-40]. Видно, що масляні вимикачі становлять більшість парку силових вимикачів UNPG. На сьогодні масляні силові вимикачі не виробляються через короткий термін комутації, використання трансформаторного масла як середовища для гасіння дуги, що підвищує пожежну небезпеку, складності експлуатації та обслуговування [41]. З вищезазначених причин нині існує велика стурбованість щодо заміни зношеного та застарілого масляного комутаційного обладнання [42]. У зв'язку з великими фінансовими витратами рішення про заміну силового вимикача має бути технічно та економічно обґрунтованим. Ця перевірка здійснюється за сумарним струмом КЗ на шинах підстанції. Основною проблемою наявної перевірки силових трансформаторів є нехтування їх агрегатним станом і технічними параметрами [43, 44]. На сьогодні у багатьох дослідженнях розглядається та аналізується проблема оцінки залишкового ресурсу силових вимикачів. Умовно роботи [45] з оцінки залишкового ресурсу вимикачів можна розділити на три напрямки:

- оцінювання залишкового ресурсу шляхом вилучення даних з використанням вимірювань параметрів вимикачів без їх відключення;
- оцінювання залишкового ресурсу шляхом онлайн-моніторингу параметрів вимикачів;
- використання нечіткої надійності для оцінки залишкового ресурсу вимикачів.

Так, у роботах [46, 47] представлено використання пірометра для визначення елементів із локальним перегрівом для визначення залишкового ресурсу вимикачів. У процесі визначення вузлів вимикача з локальними елементами цей вузол розглядали як дефектний. Потім автори ввели критерій визначення ступеня пошкодження елемента вимикача залежно від температури локального перегріву. Цей критерій дозволяє визначити необхідні дії для обслуговування досліджуваного вимикача. У роботах [48, 49] автори подають експертну модель автоматичних вимикачів із використанням нечіткої матриці та технології нейронних мереж. Експертна база даних системи побудована на основі онлайн-моніторингу. Точність системи значно підвищується за рахунок експериментальної перевірки різних типів несправностей [50]. Ця система дозволяє перейти від планового ремонту до ремонту за потреби, що сприяє підвищенню надійності та рентабельності роботи вимикача. Дослідження [51, 52] ілюструє модель оцінки вимикачів на основі теорії нечіткої надійності. У цій роботі проведено аналіз помилкової поведінки вимикача, побудовано функцію розподілу та нечітку функцію належності на підставі спостережень. На основі даних онлайн-моніторингу з використанням теорії ймовірності та нечіткої теорії розраховується нечітка надійність високовольтного вимикача [53]. Виходячи з нечітких показників надійності, робляться висновки про стан вимикача. У роботах [54, 55] дерево відмов використовувалося для оцінки терміну служби газоізоляційних вимикачів. У дослідженнях [56-58] розглядаються лише механічні пошкодження силових вимикачів. Запропоновано алгоритм

прогнозування механічних пошкоджень вимикачів на основі методу опорних векторів [59]. Для дослідження регресійних моделей опорних векторів використано ретроспективні дані. Для оцінки залишкового ресурсу вимикача в роботах [60, 61] розроблено моделі оцінки надійності окремих вузлів вимикача. Запропоновані моделі ґрунтуються на статистичних даних. Слід зазначити, що вплив аварійних режимів на функціональний стан вимикачів у розглянутих роботах не враховано. Відомо [62, 63], що переривання струму SC є найбільш важким режимом для вимикача. У момент відключення струму практично всі елементи вимикача піддаються механічному, тепловому та хімічному впливу: вводи, дугогасна камера, ізоляційне середовище, ізолятори тощо. При цьому вплив аварійних режимів на функціональний стан вимикачів не враховується. Відповідно можна дійти неправильних висновків про його функціональний стан [64, 65]. Помилка в оцінці стану вимикача може призвести не тільки до фінансових витрат підприємства-власника обладнання, але й до зниження надійності енергосистеми в цілому [66]. У роботах [67, 68] представлені результати техніко-економічних обґрунтувань моделей розрахунку аварійних режимів за ІЕС 60909 для інтегрального прогнозування залишкового ресурсу комутаційних пристроїв та прийняття рішення про заміну або ремонт силових вимикачів з урахуванням аналізу їх функціонального стану [69].

Нині знос комутаційного обладнання на електростанціях в країнах Європи, які розвиваються, перевищує 60% [70-72]. Значна частина наявного комутаційного обладнання відпрацювала свій проектний термін експлуатації та життєвий цикл, визначений нормативними документами, і використовується понад нормативний ресурс. Більше того, у сучасних ринкових умовах темпи старіння перевищують темпи оновлення обладнання [73, 74]. У зв'язку з вищевикладеним необхідна заміна застарілого обладнання на розподільних пристроях на сучасне. Поширені масляні вимикачі поступово витісняються газоізоляційними, які мають низку переваг,

як-от: пожежо- і вибухобезпечність обладнання, екологічно чисте середовище інертного газу не шкідливе для людини, зменшення маси та розмірів обладнання, висока вимикаюча здатність, низький рівень амортизації дугових контактів, а також простота монтажу та обслуговування вимикача [75, 76]. Проте в умовах обмеження інвестиційних можливостей в енергетиці повна заміна масляних вимикачів на газові не можлива, а проблема полягає в оптимізації витрат на ремонт обладнання або придбання нового [77]. З метою можливого оптимального пошуку вирішення цих завдань автори роботи запропонували новий підхід до аналізу параметрів, що визначають технічний стан комутаційного пристрою, що ґрунтується на розробленні його резервної математичної моделі з урахуванням зв'язності між параметрами обладнання та режимами його роботи і суміжною мережею [78].

Аналіз причин пожеж, які виникають на промислових підприємствах, електричному транспорті та інших об'єктах, що використовують електротехнічні пристрої постійного струму, свідчать про те, що найбільшу пожежну небезпеку викликають здебільшого силові електропроводки, прокладені до відносно потужних споживачів електроенергії й електропроводки освітлювальних мереж.

У процесі використання електропроводок їх ізоляція підпадає під вплив низки факторів, що призводять із часом до її природного старіння, яке проявляється в зменшенні електричної та механічної міцності. Основні причини, які викликають старіння ізоляції:

- дія зовнішніх негативних факторів, особливо вологи, яка спричиняє поступове зволоження у результаті проникнення її в ізоляцію крізь нещільності й розтріскування зовнішнього шару самої ізоляції або її лакової покрівлі, а також крізь інші механічні пошкодження;

- нагрівання струмом навантаження й особливо надструмами – пусковими струмами двигунів, електричних нагрівальних печей, струмами короткого замикання тощо;
- перепади температур як від зміни струмів навантаження, так і зміни зовнішнього температурного поля;
- випадкові перенапруги, у тому числі від атмосферних явищ (під час грози);
- різні механічні впливи. Наприклад, вібрації проводок разом із агрегатом і спорудами, динамічні зусилля, які виникають унаслідок різких змін струмів, що спричиняють тріщини, зміщення й стирання ізоляції;
- постійний вплив електричних полів, за яких відбувається іонізація газових включень, неминучих в ізоляції.

Під дією перелічених та інших непрогнозованих причин ізоляція електропроводок достроково втрачає свої властивості й руйнується під впливом прикладеної напруги, що призводить до її пробою або перекриття між струмоведучими проводами та утворення коротких замикань.

Освітлювальні електропроводки виконуються спільно зі штепсельними розетками через відповідні контактні з'єднання і відгалуження. За рахунок штепсельних розеток до освітлювальних мереж, як правило, приєднуються непрогнозовані додаткові навантаження, які нерідко перевищують розрахункові струми освітлювальної мережі. Як наслідок, виникають струмові перевантаження й додаткове нагрівання проводів до недопустимих температур, що може призвести до короткого замикання в електропроводці.

Важливим заходом щодо запобігання аварійних режимів під час експлуатації мереж і електричного обладнання є використання апаратів захисту – здебільшого плавких запобіжників і автоматичних вимикачів.

Найбільш розповсюдженими апаратами захисту є плавкі запобіжники, а їх основним запобіжним конструктивним елементом є плавка вставка.

Матеріалом для плавких вставок слугує свинець, сплав свинцю з оловом, цинк, алюміній, мідь, срібло і деякі інші матеріали. Найбільш практичними є вставки із тугоплавких металів: міді і срібла. На практиці найчастіше використовуються більш дешеві вставки з міді. Проте при струмах, найближчих до номінальних струмів плавкої вставки, вони нагріваються до температури 850...900 0С, що призводить до перегрівання контактів і корпусу запобіжника, які також є пожежонебезпечними.

Велике значення, з точки зору попередження пожеж, має правильний вибір номінального струму спрацювання плавкої вставки. Якщо плавка вставка запобіжника обрана правильно, то вимикання небезпечних струмів відбудеться раніше, ніж вони встигнуть утворити в захисному колі небезпечні наслідки.

Відповідно, якщо електрична мережа чи електроустановка захищається автоматичним вимикачем, то також повинні бути правильно обрані номінальні струми спрацювання електромагнітного (від КЗ) та теплового (від перевантаження) розчіплювачів. Поріг спрацювання апаратів захисту повинен відповідати струмам короткого замикання на початку ділянки кола, яка захищається.

Варто відмітити, що такі пристрої захисту не в змозі запобігти появі коротких замикань чи попередити надмірні нагрівання через наявність великих перехідних опорів. Вони призначені тільки для своєчасного розмикання коли за наявності короткого замикання чи тривалого перевантаження. Засоби, що забезпечують збереження установки, безпеку обслуговування й попередження пожеж апарати захисту через неправильний монтаж і експлуатацію можуть стати безпосередньою причиною пожежі або вибуху.

Велике значення для запобігання аварійним ситуаціям і виникненню пожеж на виробництві має система технічного обслуговування й ремонту устаткування енергогосподарств промислових підприємств.

Система технічного обслуговування й ремонту устаткування – це система так званого планово-попереджувального типу, сутність якої полягає в тому, що після відпрацювання електрообладнанням і мережами відповідної кількості часу в момент очікуваної відмови здійснюються різного виду ремонтні дії (технічне обслуговування, поточний, середній або капітальний ремонт), чергування, періодичність яких визначається призначенням агрегату (мережі) його конструктивними особливостями, (виконанням) та умовами експлуатації, а також станом навколишнього середовища.

Система технічного обслуговування й ремонту устаткування попереджує прогресуюче зношення обладнання, усуває можливість випадкового виходу його із ладу, сприяє усуненню умов, які можуть призвести до пожежі.

Роботи з технічного обслуговування електрообладнання складаються з міжремонтного нагляду і профілактичних випробувань. Нагляд у міжремонтний період планується як самостійна операція і передбачає постійне спостереження за виконанням вимог, зазначених у технічних керівних документах виробників. До того ж призначенням міжремонтного обслуговування є своєчасне усунення незначних несправностей, зокрема ліквідація послаблених контактних з'єднань, регулювання обладнання й апаратури тощо.

Однак функціонування системи технічного обслуговування й ремонту тісно пов'язане з наявністю «людського фактору», відтак можна сформулювати недоліки, які знижують ефективність її функціонування:

- низька якість обслуговування. Якщо персонал, що відповідає за технічне обслуговування та ремонт, не має достатнього досвіду або кваліфікації, це може призвести до неправильного виявлення проблем і помилок у їх розв'язанні;

- недостатня частота обслуговування. Якщо технічне обслуговування проводиться не часто або неправильно розподіляється за часом, це може призвести до накопичення проблем та збільшення ризику виникнення аварій;
- недостатність устаткування та ресурсів. Відсутність необхідного обладнання, інструментів або резервних частин може ускладнити або уповільнити процес технічного обслуговування та ремонту;
- відсутність системи моніторингу та самодіагностики. Така ситуація може призвести до пропуску важливих ознак про можливі несправності або проблеми в електрообладнанні;
- неправильне планування ремонтних робіт. Недооцінка тривалості та обсягу ремонтних робіт може стати причиною перебоїв у роботі та збитків для виробництва;
- незадовільне документування. Недостатнє ведення документації з обслуговування та ремонту ускладнює відстеження історії проблем та рішень, а також недостатньо точно оцінює ефективність системи технічного обслуговування та ремонту електроустаткування;
- обмежена сфера застосування. Такі системи, як правило, функціонують на потужних промислових підприємствах, і не запроваджені в житловому секторі, малому підприємстві тощо.

Ці недоліки можуть призвести до збільшення ризику аварій, зниження надійності та продуктивності електроустаткування, а також до збитків для власників об'єктів.

У країнах Європи, що розвиваються, для обслуговування обладнання використовується система технічного обслуговування, що є найпростішим способом планування ремонтів і технічного обслуговування обладнання [79].

Однак це не може в повному обсязі забезпечити прийняття оптимального рішення в сучасних економічних умовах, що пояснюється тим, що технічне обслуговування та ремонт проводяться без урахування фактичного технічного стану елементів електрообладнання, черговості



відключень, а також фінансових, трудових, тимчасових і технологічних обмежень, які ускладнюють плановий ремонт [80, 81]. Усі ці фактори призводять до збільшення кількості відмов через амортизацію, зростання чисельності ремонтного персоналу, зниження якості технічного обслуговування і, як наслідок, погіршення стану енергооб'єктів [82-84]. Оцінка фактичного стану масляних вимикачів за результатами діагностики є досить складним завданням, актуальність якого визначається переліченими вище причинами [85]. Існує дві групи методологій для діагностики вичерпаного та залишкового терміну служби високовольтних вимикачів:

- контроль терміну придатності та залишкового ресурсу на основі даних, наданих виробником. Основна частина виробників автоматичних вимикачів надає дані про вихідний ресурс вимикачів, а також дані, необхідні для оцінки їх технічного стану під час роботи в номінальних умовах;

- контроль терміну придатності та залишкового ресурсу на підставі даних, отриманих засобами та методами технічних випробувань та діагностики.

Ця група методик передбачає оцінювання фактичного стану обладнання за результатами контрольовано-вимірювального спостереження [86, 87]. За допомогою приладів контролю здійснюється оцінювання стану вимикачів.

Сучасні методики оцінювання технічного стану вимикачів в основному зводяться до аналізу фактичних параметрів та їх порівняльного аналізу з граничними значеннями, визначеними нормативними документами, такими як [88-89], що визначають допустимі технологічні параметри масляних і магнітних вимикачів [90-91].

Через досить високу вартість комутаційних пристроїв, для їх діагностики використовуються методи неруйнівного контролю (НК), які не потребують руйнування виробу, кожен з яких регламентується своїм державним стандартом. За результатами діагностики та випробувань

визначають перевищення фактичних параметрів, а також виявляють дефекти, їх розташування та причини. Для оцінювання технічного стану автоматичних вимикачів найчастіше використовуються такі нерозривні дослідження:

- хроматографічний аналіз газів, розчинених у маслі;
- метод моніторингу тепла;
- вимірювання електричних характеристик;
- фізико-хімічний аналіз масла тощо.

Хроматографічний аналіз дає змогу виявити дефекти обладнання на ранніх стадіях, а також визначити їх характер і ступінь пошкодження [92]. Для виявлення дефектів і пошкоджень вводів вимикачів використовується метод теплового моніторингу, виконаний згідно з [93]. Температура є універсальним показником стану електрообладнання, оскільки на всіх етапах його роботи розвиваються теплові реакції. Випадки будь-яких несправностей обладнання призводять до зміни температури [94], яка реєструється тепловізором, що робить моніторинг тепла одним із найефективніших способів діагностики. Цей метод дозволяє контролювати тепловий стан комутаційного обладнання, не виводячи його з експлуатації, виявляти пошкодження на ранній стадії і, відповідно, зменшувати витрати на огляд і ремонт [95].

Приводи автоматичних вимикачів забезпечують автоматичне й ручне розмикання та замикання комутаційного пристрою, а також утримання його в закритому стані.

Діагностика приводів вимикача проводиться за кількома критеріями: швидкістю контактів під час розмикання або замикання (м/с), максимальною швидкістю контактів (м/с) і часом замикання (с). Для управління приводом вимикача використовується вібраційний неруйнівний контроль, що спирається на спеціальний електромагнітний вібратор [96].

Динамічні сили в приводі викликають вібрацію, а дефекти обладнання змінюють характеристики вібрації та шуму. За статистичними даними, із

загальної кількості відмов елементів протипожежного захисту частка відмов конструкцій розподіляється таким чином: ланцюги керування – 42%, привод – 26%, дугогасна камера – 18%, вимикач, втулки та ізоляція опор – 14% [97]. При цьому іноді неможливо розпізнати дефект і визначити стан розриву навіть на підставі набору ознак (наприклад, за допомогою різних методів діагностики) у різноманітному просторі ознак за умов перетину та багатозначних класів об'єктів, тому використання класичних методів статистичного аналізу в деяких випадках може призвести до неприпустимих неточностей. Отже, для цього дослідження була розроблена розширена математична модель аналізу технічного стану вимикачів, що ґрунтується на нейронечітких висновках [98]. Модель містить не тільки дані технічної діагностики, а й облік зв'язності параметрів обладнання та режимів його роботи в суміжній електричній мережі як засіб аналізу струмів короткого замикання в суміжній мережі [99].

Нині актуальною є проблема високих рівнів струмів короткого замикання елементів протипожежного захисту. Оскільки встановлена потужність електростанцій в енергосистемі та загальне навантаження постійно зростають, необхідно нарощувати пропускну здатність електромережі від великих електростанцій до електроцентрів промислового та побутового навантаження, що потребує будівництва нових електромереж. Збільшення встановленої потужності електростанцій та інтенсивний розвиток інфраструктури електромереж зумовлюють безперервне зростання струмів короткого замикання в енергосистемі, що призводить до необхідності розробки заходів щодо їх обмеження [100]. Це пояснюється тим, що відключаюча здатність великої кількості комутаційного обладнання не відповідає розрахунковим рівням струмів короткого замикання. Заміна існуючих вимикачів є дорогою, через що доцільно розглянути альтернативні технічні рішення, у тому числі реалізацію стаціонарної секції електричної

мережі, що в свою чергу вимагає врахування ряду критеріїв впливу на режим енергосистеми.

У роботі [101] розглянуто модель оцінювання заходів щодо обмеження струмів короткого замикання. Як міри розглядаються різні комбінації точок стаціонарного розрізу мережі. Критерії оцінювання багато в чому ґрунтуються на методиці визначення підстанцій-індикаторів, представленій у [102]. Крім оцінювання рівнів струмів короткого замикання в зоні розподілу електроенергії, також використовується критерій оцінювання стабільності та працездатності електромережі. Детальний опис розробленої методики та приклад розрахунку для оцінювання заходів щодо обмеження струмів короткого замикання в енергосистемі буде представлено далі.

У деяких галузях промислового виробництва (хімічна промисловість, сільськогосподарське виробництво, машинобудування та інші) під час експлуатації електроприводів захист електродвигунів від перевантажень та інших ненормальних режимів автоматичними вимикачами і тепловими реле не задовольняє вимогам високої надійності. Для ряду електроприводів з важкими умовами роботи (транспортери, деякі металорізальні верстати, двигуни компресорів високого тиску, роздавачі та змішувачі кормів, відповідальні вантажно-підйомні механізми з інтенсивним режимом роботи, тощо) застосовується температурний захист двигунів. При цьому контролюється основний фактор, що може спричинити вихід із ладу двигуна – температура його обмоток.

Вбудований температурний захист призначений для вимикання електродвигуна к таких випадках: тривалих перевантаженнях, неправильних процесах пуску і гальмування, підвищеній частоті вмикань, обриві фази, коливаннях напруги, заклинюванні ротора й підвищеній температурі навколишнього середовища.

Для здійснення температурного захисту в лобові частини обмоток електродвигунів вбудовують термочутливі елементи – позистори

(терморезистори із позитивним температурним коефіцієнтом опору). Позистори розміщують по одному на кожну фазу обмотки статора (всього три), усі вони з'єднуються послідовно, а два спільні кінці виводяться на клемну колодку затискачів двигуна за маркуванням T1 і T2.

Датчики температури вмикають у схему приладу контролю, який підсилює сигнал від температурних датчиків і перетворює його на сигнал для керування електромагнітними пускачами серій тощо.

Безпосередньо подальші авторські дослідження спираються на такі припущення: наявність великого перехідного опору в місці комутації призводить до надмірного локального нагрівання, за якого не відбувається значних змін контрольованих характеристик електричного струму в колі. Як наслідок апарати захисту не спрацьовують [103-107].

Для попередження небезпечного тепловиділення слід запропонувати обладнати електричний елемент системи протипожежної безпеки електричних мереж температурними запобіжниками, які спрацьовуватимуть у разі перевищення допустимої температури з'єднання і припинятимуть подальше нагрівання шляхом розмикання електричного кола [108-110].

З метою обрання оптимальних характеристик температурних запобіжників слід визначити умови, за яких забезпечуватиметься нормальна робота з'єднання в місці надмірної комутації для тривалих максимально допустимих навантажень та відбуватиметься розмикання електричного кола за умови досягнення граничного значення температури [111-114].

Таким чином, для попередження небезпечного тепловиділення запропоновано обладнати електричний елемент системи протипожежної безпеки електричних мереж температурними запобіжниками, які спрацьовуватимуть у разі перевищення допустимої температури з'єднання і припинятимуть подальше нагрівання шляхом розмикання електричного кола.

### 1.3. Постановка задачі дослідження

Дисертаційне дослідження присвячено вирішенню важливого наукового завдання у сфері пожежної безпеки, а саме: запропоновано шляхи підвищення ефективності протипожежного захисту електричних мереж в умовах надмірного локального нагріву в місцях комутації надмірних споживчих потужностей, що забезпечує мінімізацію наслідків загоряння та унеможливорює подальший розвиток пожежі.

Мета дослідження полягала в підвищенні ефективності протипожежного захисту електричних мереж, які функціонують в умовах надмірного локального нагріву, за рахунок розроблення елемента (розеткового модуля) із вбудованим температурним запобіжником.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі наукові завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан з підвищення ефективності протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей.
2. Розробити структурно-логічну модель елемента системи протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей.
3. Розробити математичну модель протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей.
4. Розробити фізичну модель елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей.
5. Перевірити достовірність та варіанти впровадження розроблених моделей протипожежного захисту.

У дисертаційній роботі у процесі розроблення моделей використовувалися методи системного, структурного, функціонального і математичного аналізу, теорії математичної статистики; для оцінювання ефективності математичного моделювання, достовірності отриманих

результатів та висновків – теорія ймовірностей, метод морфологічного аналізу, методи планування наукових експериментів і обробки їх результатів.

Доведено, що найбільш ефективним упровадженням розроблених моделей протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей є сучасна електрична розетка з температурними запобіжниками, які спрацюватимуть у разі перевищення допустимої температури з'єднання й припинять подальше нагрівання шляхом розмикання електричного кола. Остання може використовуватися в усіх наявних вітчизняних системах протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей.

### **Висновки до першого розділу**

1. Проведено аналіз шляхів підвищення протипожежного захисту споруд та електричних мереж, який показує стійку тенденцію до збереження кількості пожеж від джерел запалення електричного походження. Незважаючи на розвиток сучасних апаратів захисту, електричні розетки залишаються одним із місць, де внаслідок виникнення великого перехідного опору можуть відбуватися значні тепловиділення. Підвищення температури штепсельного з'єднання може стати причиною самозаймання деталей розеток та оздоблювальних матеріалів.

2. Для попередження небезпечного тепловиділення запропоновано обладнати електричний елемент системи протипожежної безпеки електричних мереж температурними запобіжниками, які спрацюватимуть у разі перевищення допустимої температури з'єднання і припинять подальше нагрівання шляхом розмикання електричного кола.

## **РОЗДІЛ 2**

### **СТРУКТУРНО-ЛОГІЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕМЕНТУ СИСТЕМИ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ У МІСЦЯХ КОМУТАЦІЇ НАДМІРНИХ СПОЖИВЧИХ ПОТУЖНОСТЕЙ**

Вирішувати друге завдання наукового дослідження з розробки структурно-логічної моделі елементу системи протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей будемо наступним чином. Спочатку проаналізуємо причини виникнення пожеж та шляхи підвищення пожежної безпеки електричних розеток. Після чого розробимо структурно-логічну модель елементу системи протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей.

#### **2.1. Аналіз причини виникнення пожеж та шляхи підвищення пожежної безпеки електричних розеток**

Як уже відмічалось в попередньому розділі, основними причинами виникнення пожеж в електричних мережах і електроустановках є короткі замикання, струмові перевантаження та великі перехідні опори контактних з'єднань струмоведучих проводів, які в основному виникають через несправність і неправильну експлуатацію електроустановок та пристроїв. У більшості випадків пожежі відбуваються в результаті перегріву й займання ізоляції, спалимих речовин і матеріалів, що знаходяться в безпосередній близькості до електрообладнання, струмових провідників і електричних машин, до місць великих перехідних опорів тощо.

Особливості пожежної небезпеки ліній електропередач полягає в тому, що можливість утворення джерела запалювання (виникнення електричних



дуг, іскор, високої температури) зберігається, як під час нормальної роботи, так і під час аварій і може розповсюджуються на всю довжину лінії від аварійної ділянки до джерела живлення – трансформатора або генератора.

Умовами виникнення джерела запалювання є:

I. Аварійні ситуації:

- обрив струмонесучого проводу;
- під дією електродинамічних зусиль під час короткого замикання на лінії;
- у разі пошкоджень у місцях з'єднання проводів;
- у разі механічних пошкоджень електрообладнання або самих проводів;
- під дією природних явищ (повені, блискавки тощо).

У разі обриву провідника під струмовим навантаженням в точці розриву виникає електрична дуга. Це призводить до розплавлення проводів та опорних конструкцій, від яких провід в нормальних умовах конструктивно ізолюваний. Далі може виникати коротке замикання, як наслідок утворюється велика кількість розплавлених часток металу, температура яких досягає 1000 °С і більше. Розлітаючись у навколишньому середовищі, вони можуть стати джерелом запалення.

Слабкою ланкою ліній живлення є місце з'єднань кінців проводів. З часом, під впливом механічних зусиль, температурних деформацій, щільність прилягання проводів у з'єднувачах стає слабкою.

У місцях нещільних з'єднань, під дією протікаючого струму, виникають великі перехідні опори, відбувається виділення значної кількості теплової енергії, що призводить до їх нагрівання й утворення розжарених та іскристих ділянок на лінії.

«Перекриттям» повітряних проміжків між проводами або між ними та металевими опорними конструкціями в разі перенапруги, яка виникає в

момент ураження лінії блискавкою, що призводить до утворення потужних іскрових розрядів.

Дугові «перекриття» або пробої ізоляції через старіння матеріалу, розтріскування під дією сонця, вітру, вологи, морозу, що так само викликає іскрові розряди.

Порівняно з повітряними лініями, кабельні лінії дають менше можливостей для утворення відкритих джерел запалювання, особливо в нормальних умовах. Але для кабелів характерна інша пожежна небезпека – можливість перегрівання жил. На відміну від відкрито прокладених проводів, які ефективно охолоджуються повітрям, кабельні жили, по-перше, притиснуті одна до одної, по-друге, зовні загорнуті в загальну оболонку. Звісно, що через такий тепловий бар'єр теплота передається від жил значно повільніше, тому для кабелів дуже шкідливими є струмові перевантаження. У кабелях, окрім зовнішнього, існує своє внутрішнє, горюче середовище. Це горючі матеріали ізоляції, оболонки, проводів (гума, полівінілхлорид, поліетилен, кабельний папір тощо). Тож тут має місце одночасна присутність у випадку аварійної ситуації як джерела запалення, так і горючого середовища.

Мережі змінного струму напругою до 1000 В у сучасній електроенергетиці є найбільш розповсюдженими системами електропостачання в усіх галузях промислового виробництва, сільського господарства та інших сферах життєдіяльності людини, де використовується електрична енергія. Вони являють собою сукупність провідників, що з'єднують між собою в межах певного простору чи приміщення електроустановки з пристроями розподілення електроенергії, захисту й керування.

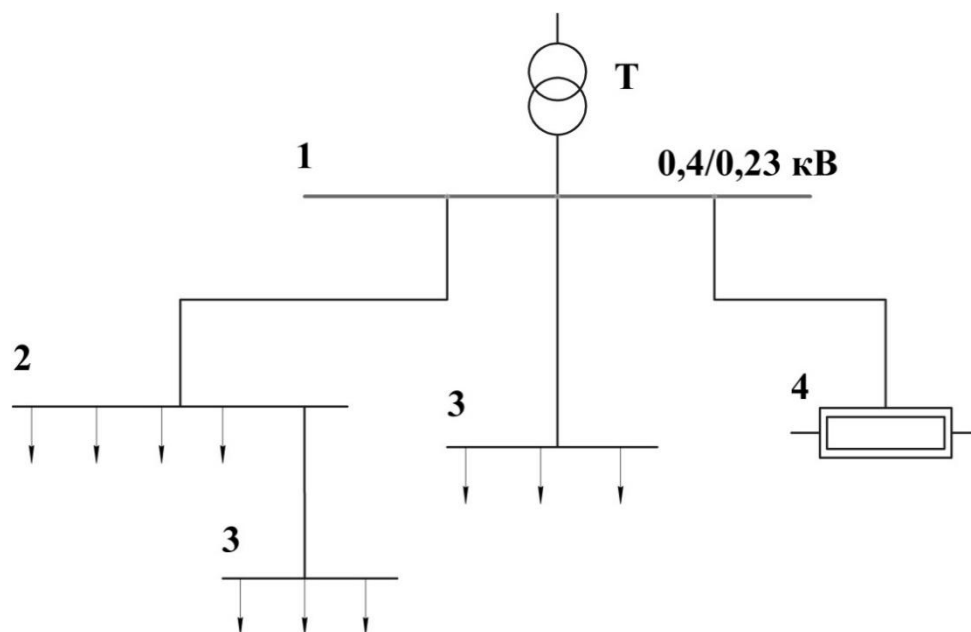
Найбільш поширеними для низьковольтних мереж електротехнічних установок напругою до 1000 В є напруги 400/230 В (трипровідні й чотирипровідні системи із заземленою нейтраллю) і 500 та 660 В.

Промислові підприємства є основними споживачами електричної енергії, споживаючи близько  $2/3$  усієї електроенергії, що виробляється в нашій країні.

Далі розглянемо деякі типові випадки електропостачання споживачам і їх відповідні схеми.

Електричні мережі в житлових будівлях, громадських спорудах та на промислових підприємствах поділяються на мережі, що слугують для живлення різного електричного обладнання та освітлювальних електроустановок. Перші прийнято називати «силовими», а другі – «освітлювальними» мережами.

Завдання розподілу електричної енергії в цехах промислового підприємства, а також на невеликих підприємствах з малою установленою потужністю, зводиться до вибирання раціональної схеми мережі. Правильно вибрана схема мережі передусім повинна забезпечити надійність електропостачання, безпечність обслуговування та пожежну безпеку. Крім того, схема мережі має бути зручною й наочною в експлуатації. Насамкінець, конструктивно вона повинна відповідати вимогам навколишнього середовища.



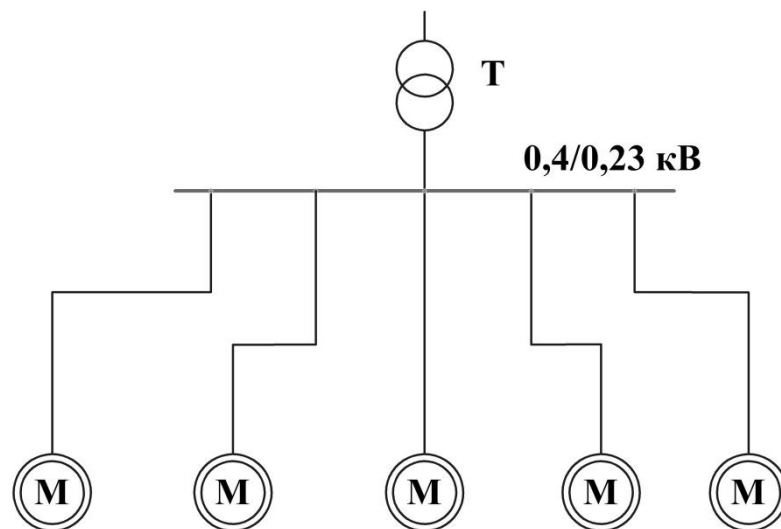
**Рисунок 2.1. Радіальна схема живлення розподільчих навантажень.**

1. Щит підстанції; 2 і 3 Розподільчі пункти; 4. Електроспоживач.

На практиці існує два види схем електричних мереж – радіальні і магістральні. Радіальні схеми характеризуються тим, що від джерела живлення, наприклад від розподільчого щита підстанції, відходять лінії, що живлять електроприймачі великої потужності або групові розподільні пункти. Від розподільних пунктів через вставлені в них захисні апарати живляться самостійними лініями інші малопотужні електроприймачі (рис. 2.1.).

Останнім часом усилу деяких недоліків таких систем, про що буде сказано нижче, на промислових підприємствах магістральні схеми почали витісняти радіальні схеми цехових мереж.

Радіальні схеми в чистому вигляді продовжують використовувати, як правило, тільки для живлення окремих зосереджених навантажень, потужних електродвигунів, електричних печей тощо (рис. 2.2.).



**Рисунок 2.2. Радіальна схема живлення зосереджених навантажень (наприклад, потужних електродвигунів).**

Найбільш типовими прикладами радіальних схем є мережі насосних або компресорних станцій. Радіальні схеми також знаходять застосування на вибухонебезпечних, пожежонебезпечних і пильних виробництвах, де розподіл електроенергії частіше виконується радіальними лініями від щитових збірок, винесених в окремі приміщення, ізольовані від несприятливого навколишнього середовища. Прикладами таких рішень можуть слугувати мережі нафтопереробних, хімічних, ливарних виробництв, мережі із потоко-транспортними системами тощо.

До позитивних якостей радіальних схем можна віднести:

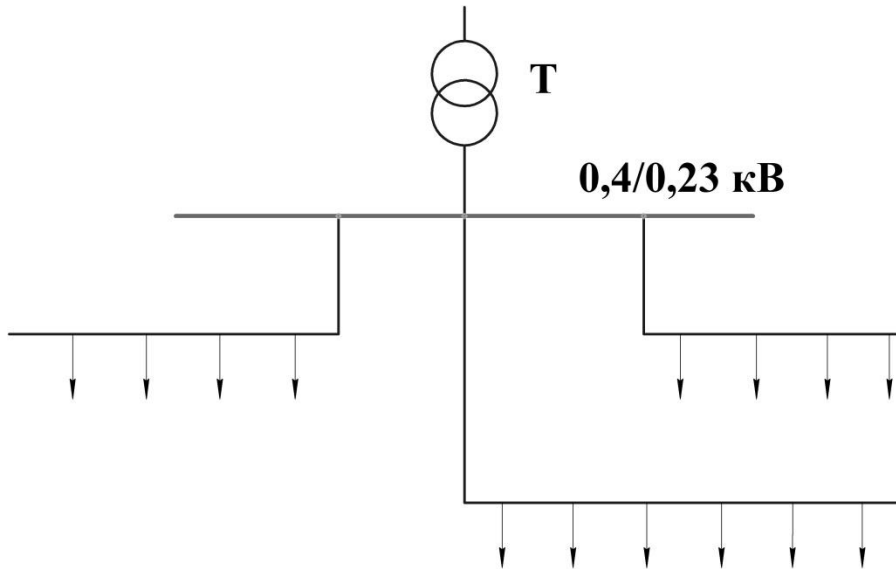
а) високу надійність живлення струмом через те, що аварія на одній лінії не відбивається на роботі електроприймачів, які живляться від іншої радіальної лінії;

б) легке пристосування до засобів автоматизації керування й захисту окремих споживачів.

Водночас для здійснення радіальних схем потрібно споруджувати розподільчі щити з великою кількістю захисних апаратів, що займають багато місця на виробничих приміщеннях. Насамкінець, як показала багаторічна експлуатація таких мереж (особливо у машинобудівній промисловості), радіальні схеми мають недостатню гнучкість. За будь-яких, навіть незначних, переміщень технологічного устаткування відбувається перерозподіл навантажень, що вимагає перероблення (перемонтажу) мереж, а це в умовах підприємства, яке працює, часто виконати важко.

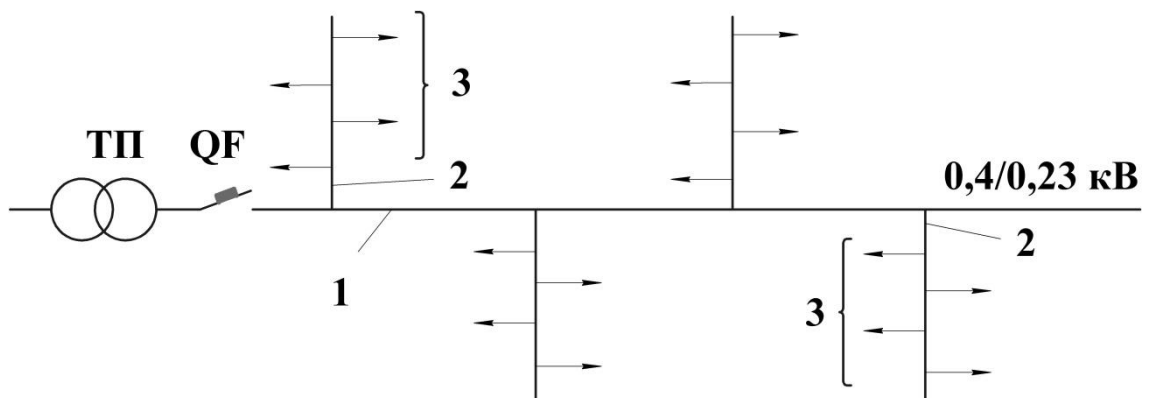
Магістральні схеми на відміну від радіальних знаходять використання для навантажень, розподілених із тим чи іншим ступенем рівномірності по площі виробничого приміщення (рис. 2.3.).

Магістральні схеми, якщо це можливо за територіальним розташуванням електроприймачів, знаходять широке застосування для живлення поточкових (конвеєрних) ліній, де відключення одного струмоприймача вимагає негайної зупинки всієї поточної лінії.



**Рисунок 2.3. Магістральна схема живлення.**

Застосування для цехового електропостачання магістральних схем дозволяє виконувати більш удосконалені схеми: блок трансформатор – магістраль (БТМ) (рис. 2.4.).



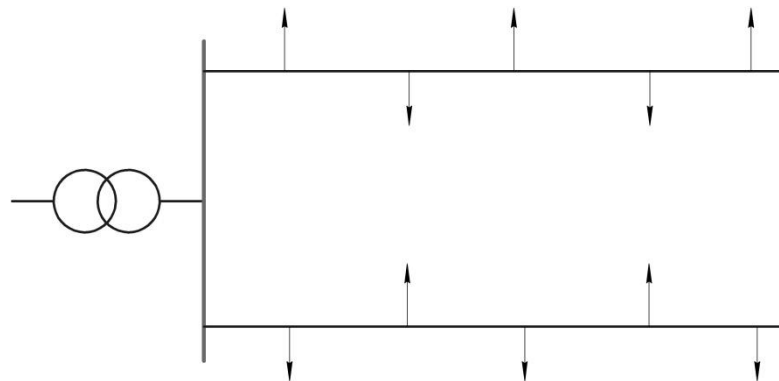
**Рисунок 2.4. Схема блока трансформатор – магістраль.**

ТП – трансформаторна підстанція; QF – автоматичний вимикач; 1 – розподільна лінія; 2 – вихідні лінії; 3 – струмоприймачі (навантаження).

У такому випадку на трансформаторній підстанції (ТП) розподільний щит не ставиться; магістраль (1) підводиться через роз'єднувач або автоматичний вимикач прямо в цех, і від неї відхідними лініями (2) живляться струмоприймачі (3).

До недоліків магістральних схем слід віднести понижену, порівняно з радіальними схемами, надійність, оскільки в разі пошкодження магістралі одночасно вимкнуться всі споживачі, що живляться від неї.

Для електропостачання цехових споживачів радіальні або магістральні схеми у чистому вигляді вживаються обмежено. Поширення знаходять так звані «змішані» схеми електричних мереж, які поєднують у собі елементи радіальних і магістральних схем; вони більш надійні й прості в експлуатації, наприклад, рис. 2.5.



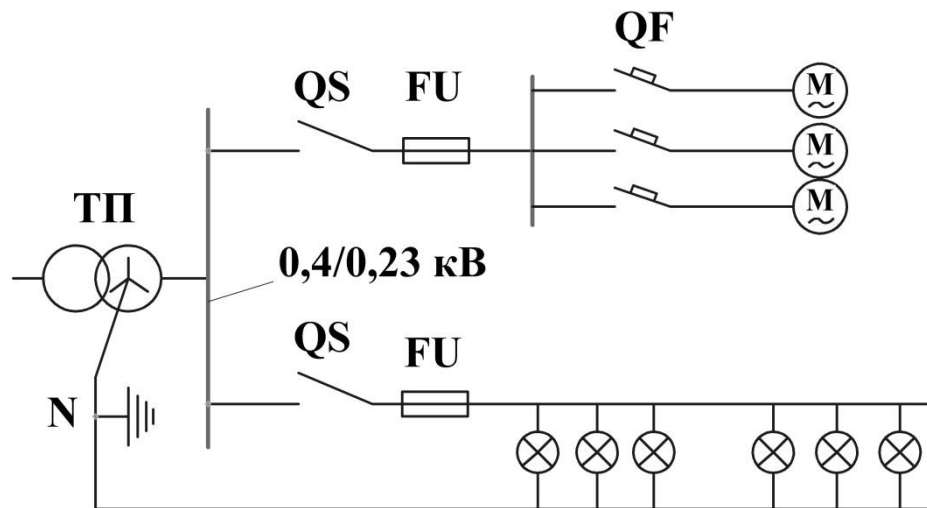
**Рисунок 2.5. Радіально-магістральна схема живлення.**

Освітлювальне навантаження в цехах промислових підприємств складає лише незначну частку від усього електричного навантаження цеху і не перевищує в звичайних умовах 10-15%, проте за своїм призначенням мережі освітлення є дуже відповідальними. Крім того, мережі освітлення відрізняються великою протяжністю і розгалуженням.

На сьогодні майже в усіх галузях промислового виробництва для живлення силових і освітлювальних установок використовують один

спільний трансформатор з глухо заземленою нейтраллю 400/230 В з системою заземлення TN-S або TN-C-S (рис. 2.6).

Хоч у більшості випадків живлення освітлювальних установок виконується від загальних трансформаторів із силовим навантаженням, усе одно лінії живлення освітлення не поєднуються із силовими лініями. Це пояснюється тим, що для сумісних магістралей на якості освітлення значною мірою позначаються поштовхи та кидки струмів силового навантаження (пуски асинхронних двигунів, перехідні процеси в момент комутації тощо), що призводить до відхилення від номінального рівня напруги на лампах у межах значно більших за допустимі.



**Рисунок 2.6. Схема блока трансформатор – магістраль для сумісного живлення силового й освітлювального навантаження.**

Найбільш допустиме відхилення напруги у споживачів для робочого освітлення промислових і комунальних підприємств, громадських споруд від +5 до -2,5% від номінального значення. Через це на практиці сумісні магістралі застосовуються тільки для живлення аварійного освітлення (рис. 2.7.), а також для живлення силових і освітлювальних установок, значно



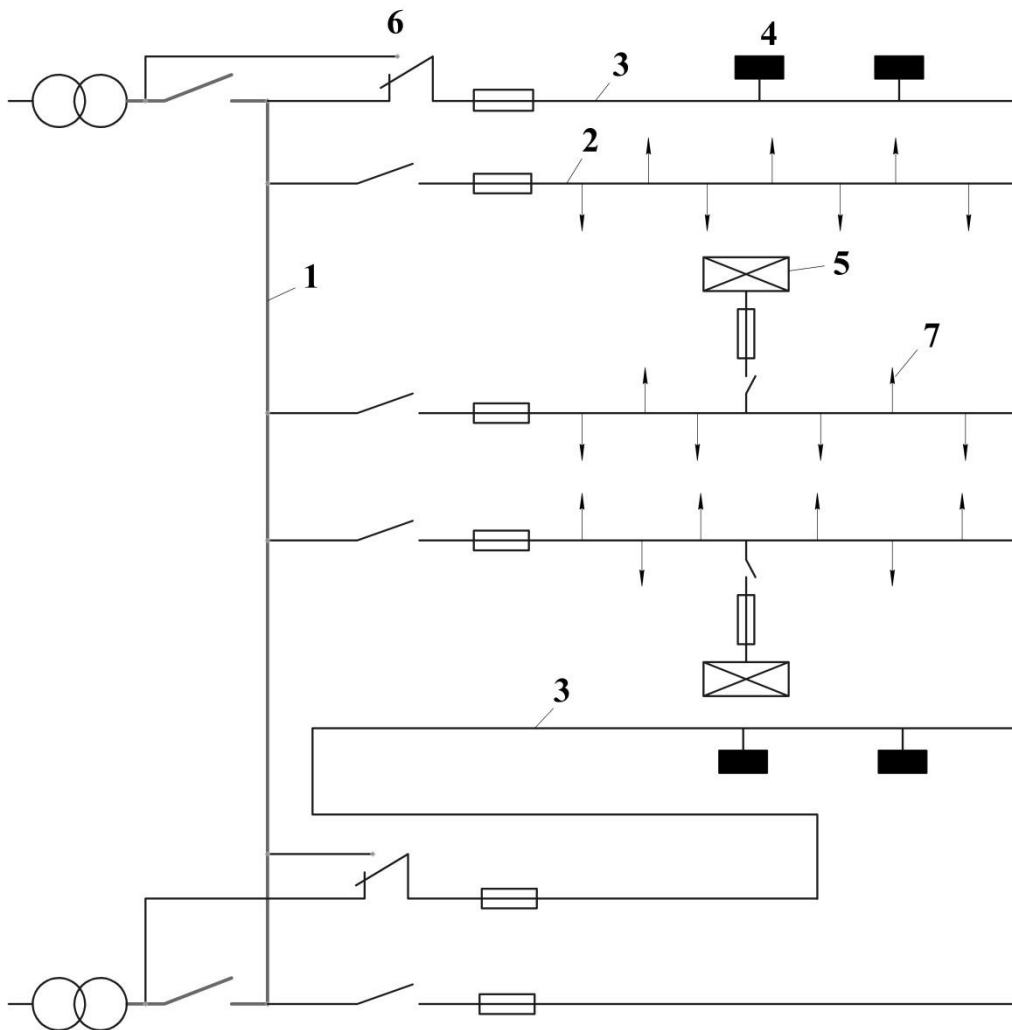
віддалених від джерела живлення (підстанції), у невеликих будівлях, таких як насосні, котельні, складські приміщення тощо.

У всіх інших випадках освітлювальні навантаження живлять окремими лініями від щитів підстанції для радіальної схеми силової мережі й по можливості від головних ділянок магістралей для магістральних схем і підстанцій, виконаних за системою блоку трансформатор – магістраль (рис. 2.7.).

Від розподільних щитків здійснюється електропостачання щитків освітлення конкретних приміщень окремими розподільними лініями, які приєднуються до групових щитків, через установлені на них апарати захисту й управління. Групові щитки встановлюються у місцях, доступних для обслуговування в найбільш сприятливому виробничому середовищі.

У сучасних системах електропостачання лінії передавання електроенергії до 1000 В змінного й постійного струмів від розподільчих пристроїв безпосередньо до споживачів відбувається із застосуванням ізольованих установлювальних проводів усіх перерізів, а також неброньованих силових кабелів з гумовою або пластмасовою ізоляцією в металевій, гумовій або пластмасовій оболонці з перерізом фазних жил до 16 мм<sup>2</sup>.

Виникнення аварійних ситуацій через великі значення перехідного опору є одним із найскладніших питань, оскільки наявність великого перехідного опору в місці комутації призводить до надмірного локального нагрівання. Крім цього не відбувається значних змін контрольованих характеристик електричного струму в колі, через які б спрацювали апарати захисту.



**Рисунок 2.7. Варіант схеми живлення робочого й аварійного освітлення для системи блока трансформатор – магістраль.**

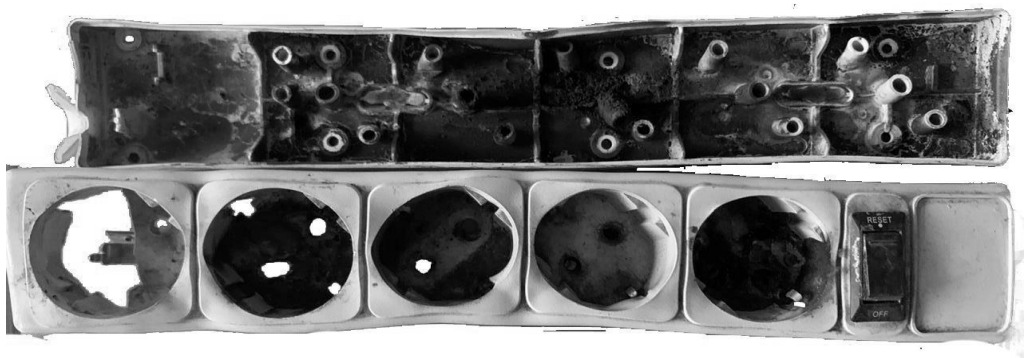
1 - магістраль живлення; 2 - розподільна магістраль; 3 - магістраль робочого освітлення; 4 - розподільний щиток робочого освітлення; 5 - розподільний щиток аварійного освітлення; 6 - перемикач на випадок ремонту магістралі живлення; 7 - силові навантаження.

Одним із місць, де через наявність великих значень перехідного опору можуть виникати загоряння, є електричні розетки. Виникнення пожеж може відбуватися через ослаблення контакту між розеткою та штепселем, унаслідок чого починає горіти ізоляція електричного проводу, горючі деталі

штепселя та розетки, а далі шпалери та інші горючі матеріали будівельних конструкцій і оздоблення (рис. 2.8).



а)



б)

**Рисунок 2.8. Приклади наслідків надмірного нагрівання роз'ємних з'єднань: а) електричної розетки, б) подовжувача**

Ще однією причиною виникнення пожеж є неякісні й старі розетки. Адже сама вилка електроприладу повинна щільно заходити в розетку. Якщо з'єднання гріється або іскрить потрібно негайно міняти штепсель та розетку. Неякісні електричні розетки можуть на вигляд бути однаковими з якісними, але в таких моделях пластик гріється й спалахує, а контакти не завжди мають притискні пружини [121].

У замкненому електричному колі відбувається обмін енергією. При цьому необхідно розрізнити два процеси: одержання електричної енергії (у джерелі ЕРС) та її перетворення в інші види (на ділянках кола, де є навантаження або спад напруги). Відповідно до закону збереження енергії, потужність, що виділяє джерело електричної енергії, повинна дорівнювати потужності перетворення в колі електричної енергії в інші види енергії.

У реальному електричному колі, джерело електричної енергії має внутрішній опір  $R_B$ . Між джерелом і споживачем електричної енергії з опором навантаження  $R_H$  можуть бути ввімкнуті й інші споживачі, у яких відбуваються безповоротні перетворення електричної енергії. Такі споживачі можуть знаходитися на значній відстані від джерела, але їх з'єднує повітряна або кабельна лінія, зокрема в (2.1.) опір  $R_L$  – це опір проводів лінії електропередачі та опір  $R_3$  – місця з'єднання. Тоді за другим законом Кірхгофа:

$$R_B \cdot I + R_L \cdot I + R_3 \cdot I + R_H \cdot I = E. \quad (2.1)$$

Якщо помножити всі члени рівняння (2.1) на струм  $I$ , одержимо баланс потужності:

$$EI = I^2 R_{BT} + I^2 R_L + I^2 R_3 + I^2 R_H. \quad (2.2)$$

У рівнянні (2.2)  $EI$  – потужність, що розвиває джерело;

$I^2 R_{BT}$ ,  $I^2 R_L$ ,  $I^2 R_3$  – втрати потужності в джерелі, лінії та місця з'єднання;

$I^2R_n$  – потужність, яку використовує споживач, тобто «корисна» потужність.

Із аналізу останнього рівняння виходить, що чим більший опір з'єднання  $R_3$  та сила струму в колі  $I$ , тим більші безповоротні втрати потужності в цих елементах.

Втрати енергії  $I^2R_3$  відповідно до відомого закону Джоуля-Ленца супроводжуються перетворенням електричної енергії в теплову енергію, причому кількість теплової енергії що виділяються  $Q_3$  залежатиме від часу протікання струму  $t$ :

$$Q_3 = I^2R_3t \quad (2.3)$$

Саме тому головною причиною того, що розетки плавляться, є тепло, яке завжди виділяється за наявності поганого контакту провідників, тобто великого значення перехідного опору.

У конструкції механізму розетки є два місця, де може утворюватися тепло:

- 1) контакт між струмоведучими проводами і клемми механізму самої розетки;
- 2) контакт між пелюстками розетки й штекерами вилки електроприладу.

Гвинтове з'єднання клем із часом слабшає, унаслідок чого утворюється мікрощілина між проводом і клемою, що зменшує площу зіткнення поверхонь, і знову ж таки, на маленькій площі контакту сконцентрований великий струм, який викликає виділення тепла. За збільшення зазору може виникати іскріння (іноді можна чути дзижчання всередині розетки), що теж супроводжується виділенням тепла. Щоб уникнути таких негативних наслідків, необхідно після установки розетки періодично підтискати різьбові

з'єднання. Не зайвим буде під гвинти встановити гравера, оскільки вони утримують гвинт від довільного ослаблення.

У якісних розетках на контактних пластинах установлені пружинні хомутики, які перешкоджають деформації пелюсток і ослабленню контакту. У неякісних – таких підсилень немає, унаслідок чого пелюстки досить швидко деформуються.

Існують конструкції контактів розетки, які містять нерухомі пелюстки й притиснуту пружиною рухому контактну пластину.

Пружини притискають пелюстки до штирів вилки, що створює постійний надійний контакт.

Однак під час експлуатації роз'ємних з'єднань можлива дія чинників, які призведуть до виникнення небезпечних значень перехідних опорів навіть за умови використання оптимальної конструкції контактної групи елементів розетки. Зокрема можливе надмірне окиснення контактів, потрапляння сторонніх предметів, використання штепсельних вилок з різним діаметром штирів, пошкодження поверхні контактуючих елементів дією електричної дуги та іскор, які можуть виникати в момент розмикання увімкнених приладів.

Попередження пожеж від електричних розеток можна досягти за рахунок розмикання електричного кола під час нагрівання контактної з'єднання вище певного граничного значення. Поставлену задачу пропонується вирішити шляхом використання теплових запобіжників або реле, які необхідно розмістити в корпусі розетки таким чином, щоб вони дотикалися до струмопровідних пластин розетки безпосередньо або через теплопровідні матеріали. При цьому тепловий запобіжник або реле необхідно приєднати в електричне коло послідовно між проводом електричної мережі та контактними пластинами розетки.

На сьогодні температурний запобіжник використовується для запобігання пошкоджень різних електричних і теплових приладів,

електромашинних інструментів і промислового устаткування від перегріву. Спосіб роботи полягає в тому, що за нормальних робочих температур плавкий сплав проводить струм у звичайному режимі. Під час перевищення номінальної температури плавиться легкоплавкий елемент, який розмикає електричне коло. Так само термозапобіжник розрахований на захист від перевантаження струму. У разі перевищення одного із заданих параметрів ланцюг розмикається й знеструмлюється, тим самим перешкоджаючи займанню.

Згідно із ІЕС691 для температурних запобіжників визначають низку параметрів, що характеризують їхню роботу, зокрема:

- номінальну температуру функціонування,  $T_F$  – температура, за якої термозапобіжник змінює свій стан провідності, щоб вимкнути схему. Допуск відповідно до ІЕС691 від +0 до -10 градусів;

- температуру спрацювання,  $T_{CUT-OFF}$  – температура спрацювання, яка вимірювалася в силіконовій масі з підвищенням температур на 0,5 -1 градус за хвилину, при цьому струм, що протікав через температурний запобіжник, не перевищував 100 мА;

- тривалу температуру,  $T_H$  – максимальна температура, за якої не відбувається спрацювання термозапобіжника протягом 168 годин під час протікання номінального струму;

- максимальну границю температури,  $T_M$  – максимальна температура, за якої термозапобіжник може працювати протягом 10 хвилин;

- номінальний струм,  $I_R$  –максимально допустимий струм, за якого термозапобіжник здатний виконувати свою функцію – розімкнути електричне коло;

- номінальну напругу,  $U_R$  – максимально допустима напруга, за якої термозапобіжник здатний виконувати свою функцію – розімкнути електричне коло.

Для оцінювання можливості захисту штепсельного з'єднання температурними запобіжниками необхідно розглянути особливості спрацювання термозапобіжників.

Таким чином, для попередження небезпечного тепловиділення необхідно обладнати електричну розетку температурними запобіжниками, які спрацюватимуть під час перевищення допустимої температури з'єднання і припинять подальше нагрівання шляхом розмикання електричного кола.

З метою обрання оптимальних характеристик температурних запобіжників необхідно до параметрів структурно-логічної моделі, яка розробляється, визначити умови, за яких забезпечуватиметься нормальна робота з'єднання штепсель-розетка для тривалих максимально допустимих навантажень та відбуватиметься розмикання електричного кола за умови досягнення граничного значення температури.

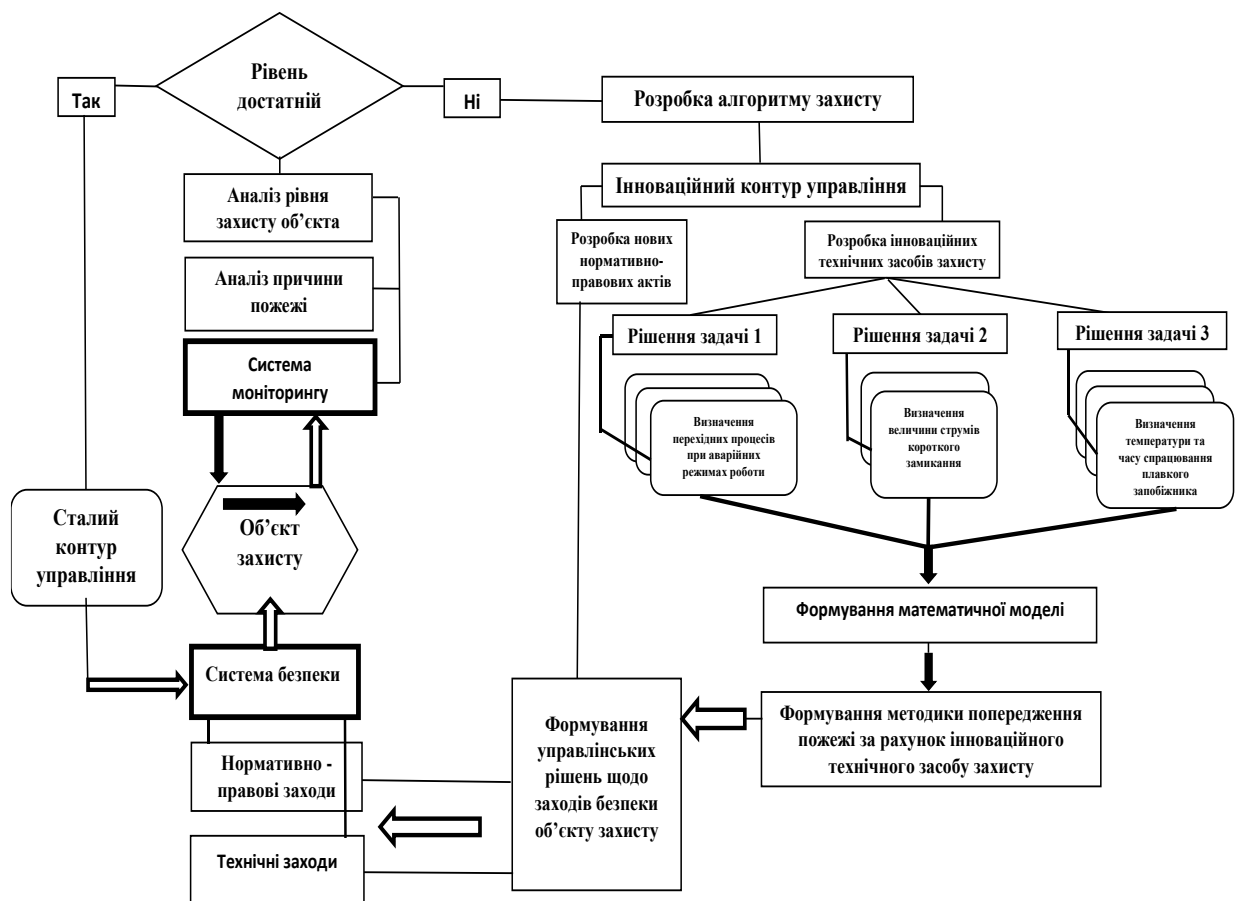
## **2.2. Структурно-логічна модель елемента системи протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей**

Відповідно структурно-логічна модель елемента системи протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей повинна ґрунтуватися на наступних принципах забезпечення ефективності процесу протипожежного захисту:

- 1) безперервності процесу протипожежного захисту;
- 2) послідовності процесу протипожежного захисту;
- 3) гнучкості схеми управління процесом протипожежного захисту;
- 4) стійкості схеми управління процесом протипожежного захисту.



Відтак структурно-логічна модель елемента системи протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей складається з двох контурів управління процесом протипожежного захисту, а саме: контуру управління в умовах достатності наявного протипожежного захисту (достатнього) та контуру управління процесом протипожежного захисту в умовах комутації надмірних споживчих потужностей (інноваційного) (рис. 2.9).



**Рисунок 2.9. Структурно-логічна модель елемента системи протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей.**

Контур управління процесом протипожежного захисту в умовах достатності наявного протипожежного захисту складається із:

- 1) Системи моніторингу, яка повинна включати:
  - 1.1) аналіз причин пожежі;
  - 1.2) аналіз рівня захисту об'єкта;
- 2) Системи безпеки, яка складається з низки чинників:
  - 2.1) нормативно-правового характеру;
  - 2.2) технічного характеру.

Включення додаткового (інноваційного) контуру управління процесом протипожежного захисту в умовах комутації надмірних споживчих потужностей додатково повинно забезпечити розроблення інноваційного алгоритму захисту за наступними напрямками:

- 1.1) Розроблення нових нормативно-правових актів;
- 1.2) Розроблення інноваційних технічних засобів захисту.

Останній елемент у свою чергу включає:

- 1.2.1) розв'язування окремої задачі визначення перехідних процесів при короткому замиканні;
- 1.2.2) розв'язування окремої задачі величини струмів короткого замикання;
- 1.2.3) розв'язування окремої задачі визначення температури та часу спрацювання плавкого запобіжника;
- 1.3) Формування математичної моделі попередження пожежі;
- 1.4) Формування методики попередження пожежі за рахунок інноваційного технічного засобу захисту;
- 1.5) Вироблення управлінських рішень щодо заходів безпеки об'єкту захисту.

Таким чином, структурно-логічна модель елемента системи протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей, складається з двох контурів управління процесом

протипожежного захисту: контуру управління в умовах достатності наявного протипожежного захисту (достатнього) та контуру управління процесом протипожежного захисту в умовах комутації надмірних споживчих потужностей (інноваційного), який функціонує в разі встановлення факту наявності обмежень достатності наявного протипожежного захисту. Він складається з восьми блоків, а саме: розроблення нових нормативно-правових актів; розроблення інноваційних технічних засобів захисту; розв'язування окремої задачі визначення перехідних процесів при аварійних режимах роботи; розв'язування окремої задачі величини струмів короткого замикання; розв'язування окремої задачі визначення температури та часу спрацювання плавкого запобіжника; формування математичної моделі попередження пожежі; формування методики попередження пожежі за рахунок інноваційного технічного засобу захисту; вироблення управлінських рішень щодо заходів безпеки об'єкту захисту.

### **Висновки до другого розділу**

1. Для попередження небезпечного тепловиділення необхідно обладнати електричну розетку температурними запобіжниками, які спрацюватимуть у разі перевищення допустимої температури з'єднання і припинятимуть подальше нагрівання шляхом розмикання електричного кола.

З метою обрання оптимальних характеристик температурних запобіжників необхідно до параметрів структурно-логічної моделі, яка розробляється, визначити умови, за яких забезпечуватиметься нормальна робота з'єднання штепсель-розетка для тривалих максимально допустимих навантажень та відбуватиметься розмикання електричного кола за умови досягнення граничного значення температури.

2. Структурно-логічна модель елемента системи протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих

потужностей складається з двох контурів управління процесом протипожежного захисту: контуру управління в умовах достатності наявного протипожежного захисту (достатнього) та контуру управління процесом протипожежного захисту в умовах комутації надмірних споживчих потужностей (інноваційного), який функціонує в разі встановлення факту наявності обмежень достатності протипожежного захисту. Він складається з восьми блоків, а саме: розроблення нових нормативно-правових актів; розроблення інноваційних технічних засобів захисту; розв'язування окремої задачі визначення перехідних процесів під час короткого замикання; розв'язування окремої задачі величини струмів короткого замикання; розв'язування окремої задачі визначення температури та часу спрацювання плавкого запобіжника; формування математичної моделі попередження пожежі; формування методики попередження пожежі за рахунок інноваційного технічного засобу захисту; вироблення управлінських рішень щодо заходів безпеки об'єкту захисту.

### РОЗДІЛ 3

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ У МІСЦЯХ КОМУТАЦІЇ НАДМІРНИХ СПОЖИВЧИХ ПОТУЖНОСТЕЙ

Вирішувати третє завдання наукового дослідження з розробки математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей будемо наступним чином. Спочатку дослідимо поле формування математичної моделі. Потім отримаємо розв'язок окремої задачі з визначення перехідних процесів за короткого замикання, далі розв'яжемо окрему задачу з розрахунку струмів короткого замикання та окрему задачу з визначення температури й часу спрацювання плавкого запобіжника. Після чого дамо опис математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей, яку сформовано.

### **3.1. Дослідження поля формування математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей**

Основні параметри, які повною мірою дозволяють визначити майбутні характеристики елемента системи протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей можливо поділити на змінні, до яких слід віднести силу струму ( $I$ ) та значення перехідного опору ( $R$ ) електричного з'єднання; та незмінні, а саме: температуру нагрівання місця комутації надмірних споживчих потужностей ( $T_k$ ) та найменш стійкого, з огляду пожежної безпеки, матеріалу елемента

системи протипожежного захисту ( $T_F$ ) і доповнити останні показником часу спрацювання елемента протипожежного захисту ( $t_E$ ).

Відтак далі мова йде про формування системи рівнянь зв'язку  $\{f_1 \dots f_n\}$ , які поєднують змінні та незмінні параметри. Тож маємо наступне відображення процесу забезпечення протипожежного захисту  $\Psi_{пз}$

$$\Psi_{пз}(T_k, T_F, t_E) = f_{пз}(I, R, t); \quad (3.1)$$

З метою визначення оптимальних характеристик елемента системи протипожежного захисту необхідно визначити допустимі температури для самого елемента та матеріалів, із яких виготовлені його елементи корпусу та оздоблення.

Максимально допустима температура нагрівання  $T_{ш \max}$  з'єднувальних штирів, визначена в чинних нормативних документах, повинна бути не вищою за  $70^\circ\text{C}$  для звичайних умов.

Нагрівостійкість  $T_{нагр.ст.}$  зовнішніх частин розеток і електричних подовжувачів (крім декоративних рамок і обрамлень, виготовлених із термопластичних матеріалів) відповідно до нормативних документів повинна бути не меншою за  $103^\circ\text{C}$ . З іншого боку, матеріали, використані в процесі виготовлення розеток, можуть витримувати й вищу температуру, як наприклад, модифікований пластик марки ABS, з якого найчастіше виготовляють елементи корпусу розеток. Він здатний зберігати експлуатаційні властивості в разі підвищення температури до  $113^\circ\text{C}$ . За такої температури матеріал стає пластичний, однак плавлення розпочинається за  $180\text{-}220^\circ\text{C}$

Відповідно визначення оптимальних характеристик елемента системи протипожежного захисту необхідно здійснювати виходячи з обмежень.

Елемент системи протипожежного захисту протягом тривалого часу повинен витримувати максимально допустиму температуру  $T_{ш\ max}$  для контактного з'єднання:

$$T_H > T_{ш\ max}. \quad (3.2)$$

Температура спрацювання елементу системи протипожежного захисту  $T_{CUT-OFF}$  повинна бути нижчою від температур, за яких матеріали розетки втрачають свої експлуатаційні властивості:

$$T_{нагр.ст.} > T_{CUT-OFF}. \quad (3.3)$$

Гранична температура спрацювання  $T_m$  має бути нижчою за температуру самозаймання матеріалів розетки та оздоблення для розетки  $T_{с.з.}$ :

$$T_m < T_{с.з.} \quad (3.4)$$

Перелік поширених пожежонебезпечних речовин та матеріалів які можуть бути використані для виготовлення деталей елементу системи протипожежного захисту, а також температури займання і самозаймання цих матеріалів наведено в таблиці 3.1.

Згідно із табл. 3.1 найбільшу небезпеку становлять папір та деревоволокнисті плити.

Ураховуючи вищезазначене, розглянемо найнебезпечніший варіант із наступними вихідними даними:

а)  $T_{ш\ max}$  дорівнює  $70\ ^\circ\text{C}$ , і відповідно елемент системи протипожежного захисту повинен тривалий час працювати за цієї температури;

б) деталі елементу системи протипожежного захисту виготовлено з пластику ABS з нагрівостійкістю 103 °С;

в) горюче оздоблення стін, де встановлено елемент системи протипожежного захисту, виконано з деревоволокнистої плити та паперових шпалер.

Температура займання та самозаймання матеріалів оздоблення та деталей елементу системи протипожежного захисту відображена в Таблиці 3.1.

Таблиця 3.1.

Матеріал	Температура займання $T_z$ , °С	Температура самозаймання $T_{с.з.}$ , °С
Деревина дубова	230	370
Деревина соснова	250	390
Лінолеум ПВХ	330	410
Папір	230	230
Пінопласт	235	435
Пінополіуретан еластичний	225	450
Пластик ABS		400
Плита деревоволокниста	222	345
Полівінілхлорид	355	440
Пробкова плита	280	460

На підставі отриманих результатів у табл. 3.2 виділимо контрастним кольором параметри наявних термозапобіжників, що відповідно до вихідних даних не задовольняють умов, наведених у виразах (3.2) – (3.4).



Вибір термозапобіжників серії BF, як базового елемента системи протипожежного захисту зображено в Таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Модель	$T_{\text{CUT-OFF}}$	$T_H$	$T_M$	A	$I_R,$ B	$U_R,$ B
BF73	70±2	45	150	10	250	
BF77	76+0/-4	51	150	10	250	
BF84	82±2	58	150	10	250	
BF94	91±3	66	150	10	250	
BF99	96±2	71	150	10	250	
BF104	100±2	79	150	10	250	
BF113	109+3/-1	84	150	10	250	
BF117	115±2	92	160	10	250	
BF121	119+2/-3	94	160	10	250	
BF133	129±2	104	160	10	250	
BF142	139+2/-3	114	160	10	250	
BF157	152±2	127	172	10	250	
BF172	169+3/-1	144	189	10	250	
BF184	182+1/-3	159	210	10	250	
BF192	188±3	170	300	10	250	
BF216	214+2/-3	191	380	10	250	
BF229	226+3/-2	200	380	10	250	
BF240	235±3	200	380	10	250	

Таким чином, поле математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей перебувають межах, які обумовлені температурою спрацювання елемента

системи протипожежного захисту, яка у свою чергу знаходиться між максимально допустимою робочою температурою з'єднання штепсель – гніздовий контакт та температурою руйнування конструктивних елементів системи протипожежного захисту, а також уточнюється, з одного боку, температурою самозаймання матеріалів елементів системи протипожежного захисту, а з іншого боку, температурою самозаймання решти матеріалів, які контактують або знаходяться поруч з елементом системи протипожежного захисту.

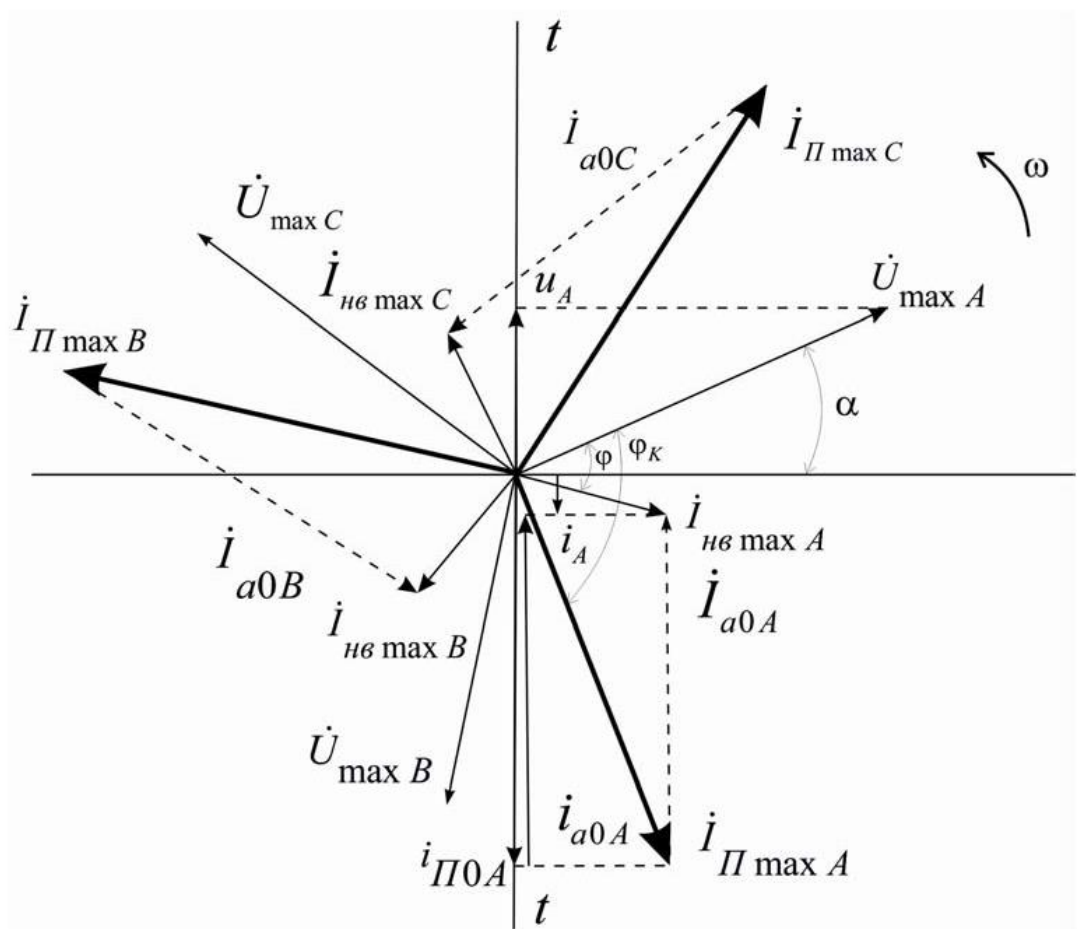
### **3.2. Розв'язування окремої задачі математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей з визначення перехідних процесів під час короткого замикання**

Для розв'язування окремої задачі математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей з визначення перехідних процесів у разі короткого замикання  $Q_1(R, I, t)$  спочатку розглянемо найпростішу радіальну мережу, яка живиться від джерела з незмінною напругою. Таке джерело називають джерелом необмеженої потужності; його граничне значення потужності теоретично не залежить від впливу зовнішніх умов.

#### **3.2.1. Визначення основних характеристик математичної моделі в умовах настання аварійного режиму у віддалених точках системи електропостачання.**

Процедура визначення основних характеристик математичної моделі в умовах настання аварійного режиму у віддалених точках системи електропостачання має загальний вигляд  $Q'_1(U, t)$ . Відтак вважаємо, що в

радіальній мережі раптово стався аварійний режим. Мережа (рис. 3.1) живиться від джерела необмеженої потужності з фазними напругами  $U_{\max A}$ ,  $U_{\max B}$ ,  $U_{\max C}$ . До виникнення аварійного режиму у мережі перебігають струми, миттєві значення яких  $i_A$ ,  $i_B$ ,  $i_C$  обумовлені напругою мережі та визначаються проєкціями обертових векторів струму  $I_{\text{нв max A}}$ ,  $I_{\text{нв max B}}$ ,  $I_{\text{нв max C}}$  на вісь часу  $t$ .



**Рисунок 3.1. Векторна діаграма струмів фаз у початковий момент часу виникнення аварійного режиму роботи електричної мережі з різким підвищенням сили струму.**

Під час виникнення аварійного режиму роботи електричної мережі з різким підвищенням сили струму з'являється дві складових: перша шунтується від джерела точкою замикання і залишається без зовнішнього живлення, а друга продовжує живитися від джерела необмеженої потужності з незмінною напругою.

Початкові значення вільного струму у фазах А, В, С зашунтованої ділянки електричної мережі збігаються з миттєвим значенням, які були присутні до моменту підвищення сили струму. При цьому значення струмів у фазах не однакові, але зменшуються з однаковим значенням постійної часу. Така закономірність визначена кутом зсуву між струмами різних фаз. Якщо, під час виникнення аварійного режиму по'язаного з різким підвищенням сили струму один із фазних струмів дорівнював нулю, то у такій фазі відсутній вільний струм, а два вільні струми інших фаз матимуть однакову величину, але протилежного спрямування.

У зв'язку зі зменшенням опору мережі унаслідок аварійного режиму з різким підвищенням сили струму порівняно з опором до настання режиму, струми  $I_{\text{ПmaxA}}$ ,  $I_{\text{ПmaxB}}$ ,  $I_{\text{ПmaxC}}$  більші за струми які були до настання режиму та відрізняються між собою зсувом за фазою (рис.3.1). Рівняння напруг для будь-якої фази аварійної ділянки мережі з різким підвищенням сили струму.

$$u = i_{\text{kGS}} r_{\text{k}} + L_{\text{k}} di_{\text{kGS}} / dt, \quad (3.5)$$

де  $L_{\text{k}} = L_{\text{kA-M}}$  – результуюча індуктивність фази (з урахуванням впливу двох інших фаз).

Розв'язок рівняння (3.5) має вигляд  $i_{\text{kGS}t} = i_{\text{ПGS}t} - i_{\text{aGS}t}$  чи розгорнено:

$$i_{\text{kGS}t} = (U_{\text{max}} / Z_{\text{k}}) \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{\text{k}}) + i_{\text{a0}} \exp(-t / T_{\text{aGS}}), \quad (3.6)$$

де  $Z_k$  – повний опір кола при аварійному режимі з різким підвищенням сили струму;  $\varphi_k$  – кут зсуву струму відносно напруги в цьому колі;  $T_{aGS} = x_k / (\omega_{гк})$  – постійна часу кола під час аварійного режиму з різким підвищенням сили струму;  $\alpha$  – фаза увімкнення аварійного режиму з різким підвищенням сили струму.

За першим законом комутації, початкове значення повного струму під час аварійного режиму з різким підвищенням сили струму дорівнює значенню струму до моменту виникнення цього режиму та має періодичну та аперіодичну складові (рис. 3.1):

$$i_{k0} = i_{нв0} = i_{п0} + i_{a0}, \quad (3.7)$$

звідки

$$i_{a0} = i_{k0} - i_{п0} = I_{нв\max} \sin(\alpha - \varphi) - I_{п\max} \sin(\alpha - \varphi_k). \quad (3.8)$$

Ураховуючи, що миттєві значення струмів  $i_{п0}$  і  $i_{k0}$  – проєкції векторів  $I_{п\max}$  та  $I_{нв\max}$  на вісь часу,  $i_{a0}$  є проєкцією вектора аперіодичної складової струму  $(I_{нв\max} - I_{п\max})$  на ту саму вісь (рис. 3.1).

Залежно від фази увімкнення  $\alpha$  (кут між напругою  $U_{\max A}$  та горизонталлю) початковий аперіодичний струм  $i_{a0}$  може досягати максимального значення, коли вектор  $(I_{нв\max} - I_{п\max})$  буде паралельним осі  $t - t$ , та знижуватися до нуля за перпендикулярного розташування цього вектора відносно осі часу.

Відтак в обох частинах СЕП визначені струми, які становлять складові повного струму в місці виникнення аварійного режиму з різким підвищенням сили струму:

$$i_{kt} = i_{kGS} + i_{кнв} \quad (3.9)$$

або

$$i_{kt} = i_{\Pi\max} \sin(\omega t + \alpha + \varphi_k) + i_{aGS0} \exp(-t/T_{aGS}) + i_{aHVB0} \exp(-t/T_{aHVB}). \quad (3.10)$$

У розгалужених мережах точне визначення постійних часу потребує значних обчислень. Для вираження результуючої аперіодичної складової сили струму аварійного режиму застосовуємо операторну форму вираження:

$$I_{kt}(p) = F_1(p) / [pF_2(p)], \quad (3.11)$$

то відповідно до формули розкладу Лапласа

$$\begin{aligned} i_{kt} &= \lambda^{-1} [F_1(0)/F_2(0) + \sum_{k=1}^n \{F_1(p_k)/p_k F_2(p_k)\} \exp(p_k t) = \\ &= i_{\Pi t} + i_{at} = i_{\Pi t} + \sum_{k=1}^n i_{a0k} \exp(-t/T_{ak}) \end{aligned} \quad (3.12)$$

Таким чином аперіодична складова струму аварійного режиму з різким підвищенням сили струму:

$$i_{at} = i_{a01} \exp(-t/T_{a1}) + i_{a02} \exp(-t/T_{a2}) + \dots + i_{a0k} \exp(-t/T_{ak}),$$

де  $T_{a1} = 1/p_1$ ;  $T_{a2} = 1/p_2$ ; ...;  $T_{ak} = 1/p_k$  – постійні часу часткових аперіодичних струмів;  $p_1, p_2, \dots, p_k$  – корені характеристичного рівняння.

Початкові значення часткових аперіодичних струмів  $i_{a01}, i_{a02}, \dots, i_{a0k}$  та їх постійних часу, являють собою деякі функції для усіх елементів у схемі.

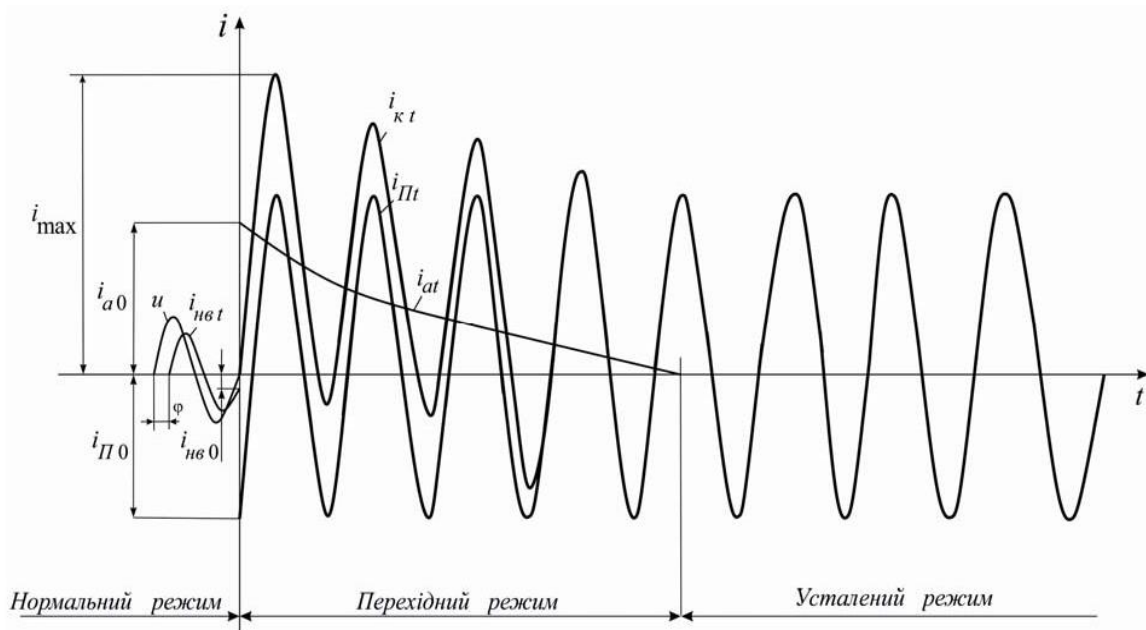
У разі виникнення аварійного режиму з різким підвищенням сили струму у живильній чи розподільній мережі СЕП струми аварійного режиму з різким підвищенням сили струму значно менші за ті, що з'являються в разі короткого замикання. Зменшення часу тривалості перехідного процесу, яке залежить від електричної віддаленості точки зниження опору, буде тим меншим, чим більш віддаленою є точка зниження опору від джерела

живлення. За виникнення аварійного режиму з різким підвищенням сили струму в електрично віддалених точках СЕП періодична складова у перехідному режимі практично не змінюється за амплітудою (рис. 3.2). Струм виникнення аварійного режиму з різким підвищенням сили струму значно перевищує номінальний і є небезпечним для елементів СЕП.

Відтак за умови виникнення аварійного режиму з різким підвищенням сили струму в електрично віддалених точках СЕП приймають, що періодична складова не змінюється з моменту початку виникнення аварійного режиму і має значення:

$$I_{П0} = I_{Пt} = I_{\infty}. \quad (3.13)$$

Аперіодична складова струму виникає за будь-якого віддалення точки КЗ від джерела і затухає тим швидше, чим більше значення активної складової опору короткозамкненого кола.

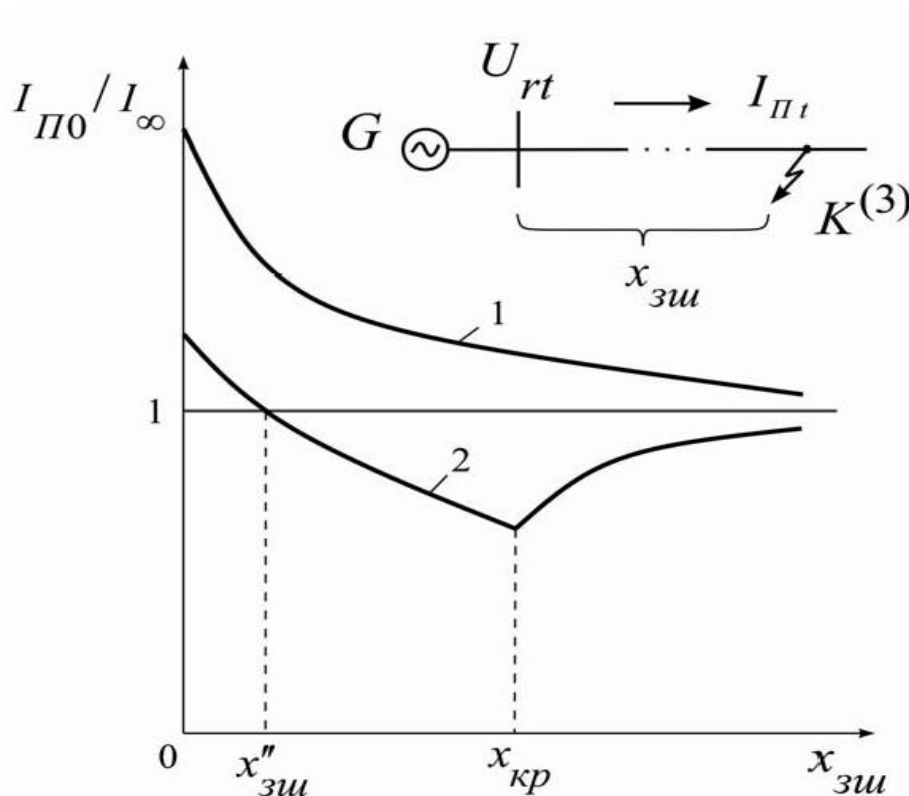


**Рисунок 3.2. Зміни в часі струму та його складових за КЗ у віддаленій точці системи електропостачання.**

Значення зовнішнього опору кола ввімкнення генератора  $x_{зи}$ , за яким під час виникнення аварійного режиму з різким підвищенням сили струму початкове значення періодичної складової струму  $I_{п0}$  та усталений струм  $I_{\infty}$  мають однакову величину, їх значення знаходимо, урахувавши відповідні е.р.с. та опори з рівняння:

$$E''_q / (x''_d + x_{зи}) = E_q / (x_d + x_{зи}), \quad (3.14)$$

де  $E''_q$  і  $E_q$  – е.р.с. генератора в початковий момент виникнення аварійного режиму з різким підвищенням сили струму. З виразу маємо:  $x_{зи} = (E''_q x_d - E_q x''_d) / (E_q - E''_q)$ .



**Рисунок 3.3.** Залежності відношення струмів  $I_{п0} / I_{\infty}$  від електричної віддаленості місця аварійного режиму та наявності пристрою АРЗ на генераторі: 1 – без АРЗ; 2 – з АРЗ.



Із побудованих залежностей відношення  $I_{I0} / I_{\infty}$  від зовнішнього опору  $x_{зи}$  (рис. 3.3), можна встановити, що за відсутності регулювання напруги (крива 1) це відношення завжди більше одиниці й гранично спрямоване до неї.

У випадку регулювання напруги (крива 2) відношення  $I_{I0} / I_{\infty}$  спочатку зменшується до мінімального значення (0,6...0,8), а потім зростає, також гранично прямуючи до 1.

Опір кола, коли відношення  $I_{I0} / I_{\infty}$  в СЕП з регулюванням напруги збільшується, називають критичним (позначають  $x_{кр}$ ). Значення  $x_{кр}$  залежить від параметрів синхронної машини та попереднього режиму роботи.

### **3.2.2. Визначення основних характеристик математичної моделі в умовах настання короткого замикання в усталеному аварійному режимі.**

Процедура з визначення основних характеристик математичної моделі в умовах настання короткого замикання в усталеному аварійному режимі має загальний вигляд  $Q''_1(U,t)$ . Після усталення всі вільні струми, які виникли під час аварійного режиму з різким підвищенням сили струму, затухають. Значення величин що характеризують коло в усталеному режимі визначають на основі характеристик холостого ходу і режиму короткого замикання, та граничного струму збудження  $I_{фгр}$ . Синхронний опір у поздовжній осі визначається:

$$x_{*d} = c / k_c, \quad (3.15)$$

де  $c$  – відносне значення електрорушійної сили під час не робочого ходу за  $I_{*f} = 1$ ;  $k_c$  – відношення короткого замикання (відносний усталений струм за трифазного аварійного режиму з різким підвищенням сили струму на затискачах генератора до відносного струму

збудження, який дорівнює одиниці). У неявнополюсних машин  $x_d \approx x_q$ , а в явнополюсних  $-x_q \approx 0,6x_d$ . При цьому  $c = 1,05 \dots 1,2$ .

Для спрощення розрахунків струмів аварійного режиму криволінійну характеристику неробочого ходу  $E_q = f(I_f)$  спрямляють, для точки  $E^* \cdot q = 1$ ;  $I^* \cdot f = 1$ . Тоді:

$$x_d^* = 1 / \kappa_c \quad (3.16)$$

$$E_q^* = I_f^* \quad (3.17)$$

Струм збудження явнополюсної синхронної машини у відносних одиницях вимірювання за заданого навантаження можна знайти з векторної діаграми (рис.3.4), урахувавши (3.17):

$$E_q \approx \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + (U \sin \varphi + I x_d)^2} \quad (3.18)$$

З векторної діаграми:  $E_q = U_d + I_d x_d = I_d (x_d + x_{зш}) + I_q r_{зш}$ ;  
 $I_q = I_d \operatorname{ctg} \varphi = I_d r_{зш} / (x_{зш} + x_q)$ .

Після перетворення останніх виразів отримаємо:

$$I_d = E_q (x_q + x_{зш}) / [(x_d + x_{зш})(x_q + x_{зш}) + r_{зш}^2]; \quad (3.19)$$

$$I_q = E_q r_{зш} / [(x_d + x_{зш})(x_q + x_{зш}) + r_{зш}^2]; \quad (3.20)$$

$$I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} = E_q \sqrt{(x_q + x_{зш}) + r_{зш}^2} / [(x_d + x_{зш})(x_q + x_{зш}) + r_{зш}^2]. \quad (3.21)$$

Залежно від електричної віддаленості точки зменшення опору в аварійному режимі з різким підвищенням сили струму, після усталення можливі два режими роботи мережі.

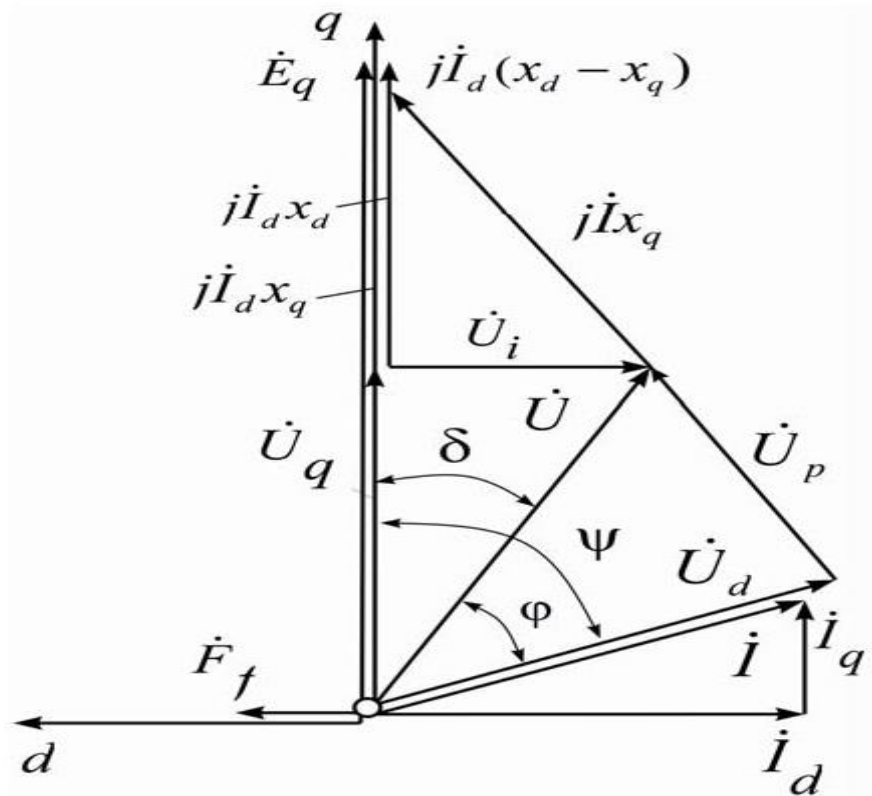


Рисунок 3.4. Векторна діаграма.

Після перетворення останніх виразів отримаємо:

$$I_d = E_q(x_q + x_{зш}) / [(x_d + x_{зш})(x_q + x_{зш}) + r_{зш}^2]; \quad (3.22)$$

$$I_q = E_q r_{зш} / [(x_d + x_{зш})(x_q + x_{зш}) + r_{зш}^2]; \quad (3.23)$$

$$I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} = E_q \sqrt{(x_q + x_{зш}) + r_{зш}^2} / [(x_d + x_{зш})(x_q + x_{зш}) + r_{зш}^2]. \quad (3.24)$$

Залежно від електричної віддаленості точки зниження опору в аварійному режимі після усталення можливі два режими роботи мережі.

Режим номінальної напруги, який характеризується співвідношеннями параметрів:

$$E_q \leq E_{q\max};$$

$$U_\Gamma = U_{\Gamma H}; \quad I_\Gamma \leq I_{\text{кр}}; \quad X_{\text{зш}} \geq X_{\text{кр}}, \quad (3.25)$$

де  $I_{\text{кр}}$  та  $x_{\text{кр}}$  – критичні струм та опір. Під час аварійного режиму у точці, відповідній опоріві  $x_{\text{кр}}$ , генератор має наступні характеристики:

$$E_q = E_{q\max};$$

$$U_\Gamma \leq U_{\Gamma H}; \quad (3.26)$$

$$I_\Gamma \geq I_{\text{кр}}; \quad X_{\text{зш}} \leq X_{\text{кр}}.$$

Критичний опір можна знайти з рівняння

$$(E_{q\max} - U_{\Gamma H}) / x_d = U_{\Gamma H} / x_{\text{кр}}, \quad (3.27)$$

звідки

$$x_{\text{кр}} = x_d U_{\Gamma H} / (E_{q\max} - U_{\Gamma H}). \quad (3.28)$$

Якщо при визначенні усталеного струму урахують узагальнене навантаження, то його звичайно виражають у відносних одиницях вимірювання за повної робочої потужності навантаження й середньої номінальної напруги живильної мережі. У такому разі:

$$x_{\text{нв}}^* = 1,2; \quad E_{\text{нв}}^* = 0.$$

### 3.2.3. Визначення основних характеристик математичної моделі в умовах комплексного навантаження з підживленням місця аварійного режиму.

Процедура з визначення основних характеристик математичної моделі в умовах комплексного навантаження з підживленням місця короткого замикання має такий вигляд  $Q''_1(U,t)$ . Відтак у процесі розрахунків струмів ураховують вплив складових комплексного навантаження, коли величина струму складає не менше 5 % у місці зниження опору. Струм у цьому випадку визначають загалом як векторну суму струмів його складових. Спрощений розрахунок допускає еквівалентування комплексного навантаження з поданням у вигляді еквівалентного джерела е.р.с. із внутрішнім опором.

Складову струму аварійного режиму з різким підвищенням сили струму від конденсаторних батарей визначають таким чином. Найбільшу амплітуду струму аварійного режиму від конденсаторних батарей поперечної компенсації знаходять за виразом:

$$I_{\max KB} = U_0 / [\sqrt{3} \omega_0 (L_{KB} + L_{зш})], \quad (3.29)$$

де  $U_0$  – являється середньою номінальною напругою на конденсаторній батареї до аварійного режиму з різким підвищенням сили струму, кВ;  $L_{KB}$  та  $L_{зш}$  – індуктивності конденсаторної батареї та контуру між батареєю і точкою аварійного режиму з різким підвищенням сили струму, Гн;  $\omega_0$  – кутова частота особистих коливань контуру та конденсаторної батареї  $\omega_0 = 1/\sqrt{(L_{KB} + L_{зш})C}$ , де  $C$  – об'єм конденсаторної батареї.

Вільна складова струму КЗ від конденсаторної батареї:

$$i_{KB} = I_{\max KB} \exp(-bt) \sin(\omega_0 t + \pi), \quad (3.30)$$

де  $b = (R_{(\omega_0)KB} + R_{зш}) / [2(L_{KB} + L_{зш})]$  – коефіцієнт затухання, Ом/Гн;  $R_{(\omega_0)KB}$  – активний опір зовнішнього контуру конденсаторної батареї за частоти  $\omega_0$ , Ом;  $R_{зш}$  – активний опір зовнішнього контуру, Ом. За наявності в мережах статичних конденсаторів їх відображають на схемах заміщення у вигляді ємнісного та індуктивного опорів.

Відтак загальний розв'язок окремої задачі математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей з визначення перехідних процесів під час короткого замикання є відображенням варіації попередньо розглянутих окремих процедур та має наступний загальний вигляд:

$$Q_I(R, I, t) = f_{1\Pi}(Q'_1(U, t), Q''_1(U, t), Q'''_1(U, t)) \quad (3.31)$$

Таким чином, розв'язування окремої задачі математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей з визначення перехідних процесів за короткого замикання передбачає послідовне визначення основних характеристик моделі: по-перше, в умовах настання короткого замикання у віддалених точках системи електропостачання; по-друге, в умовах настання короткого замикання в усталеному аварійному режимі; по-третє, в умовах комплексного навантаження з підживленням місця короткого замикання, що в подальшому дозволяє отримати основні рівняння зв'язку між змінними та незмінними перемінними шуканої математичної моделі.

### **3.3. Розв'язування окремої задачі математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей з визначення розрахунку струмів короткого замикання**

Загальний розв'язок окремої задачі математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей із визначення розрахунку струмів короткого замикання  $Q_{II}(R, I, t)$  спирається на той факт, що на сьогодні інформаційні технології все частіше застосовують під час проведення аналізу режимів експлуатації та проектування СЕП, а це у свою чергу потребує повнішого опису перехідних процесів з основних параметрів і характеристик електропостачання та електроспоживання. Розрахунок режимів містить значну кількість накопичених показників, а за варіювання початкових даних виникає необхідність в їх постійному використанні.

Обчислення струмів аварійних режимів за означеними вимогами до систем електропостачання є складною інженерно-технічною завданням, розв'язання якої може бути спрощено завдяки використанню аналогових моделей та обчислювальної техніки. Застосування обчислювальної техніки дає змогу відмовитися від багатьох припущень у ході складання схем заміщення електричної мережі. У розрахункових схемах при цьому вдається, наприклад, точніше враховувати опис роторів та складові показників аварійного режиму. Використання обчислювальної техніки для розрахунку електромагнітних перехідних процесів полягає в можливості перегляду в широкому діапазоні значень параметрів елементів системи. Отже, підвищується точність розрахунку, гарантується вірогідність отриманих результатів за заданих первинних значень параметрів для багатьох варіантів схем СЕП та різних аварійних режимів.

Точність будь-якого розрахунку на обчислювальній техніці залежить від досконалості закладеної до програми методики та певності вхідних даних. Багатоваріантні розрахунки в різних її точках за можливих змін (перехід від одного режиму до іншого). Таким чином вимоги, що зводяться до простоти підготовки вхідних даних, та обробки вихідних даних.

Математичний опис складної СЕП за взятих припущень може бути зведений до складання системи лінійних алгебраїчних рівнянь. У результаті звичайних припущень нехтують насиченням трансформаторів та реакторів, моделюють навантаження постійними опорами, джерелами напруги з сталою електрорушійною силою.

Параметри електричної мережі визначають, в тому числі, за допомогою методів з використанням рівнянь контурних струмів, вузлових напруг або безпосереднього використання закону Кірхгофа.

Під час розрахунку аварійних режимів перевага надається найпоширенішому методу вузлових напруг. Через складнішу реалізацію на обчислювальній техніці метод контурних струмів застосовується рідше, проте він простіший під час обліку взаємної індукції ЛЕП у системі нульової послідовності.

Сучасні програмні продукти дозволяють проводити розрахунки з активними складовими опорів елементів та значень електрорушійної сили за всіх аварійних режимів у складних мережах.

Для прискорення обчислення вузлових напруг береться коефіцієнт прискорення. За ітераційного метода розрахунку струмів аварійних режимів немає потреби у значних обчислювальних потужностях, а тому ним слід користуватися під час розрахунку схем електричних мереж із великою кількістю вузлів та віток.

Прямий метод розрахунку струмів КЗ з матрицею вузлових опорів схеми ефективніший з такими перевагами перед ітераційним: відсутність труднощів, пов'язаних зі збіжністю обчислювального процесу; зменшення



часу для розрахунків; прийнятна точність ортиманих результатів. Тоді стан електричної мережі під час аварійного режиму подається оберненою формою системи рівнянь вузлових напруг. Нижче описується цей алгоритм.

Вхідні дані для розрахунку аварійного режиму – це наперед побудована схема заміщення мережі. Вітки мережі заміщують комплексним опором, генератори задають активними вітками з джерелами електрорушійної сили, увімкненими за перехідними опорами, навантаження – вітками з комплексними опорами. У початковий момент перехідного процесу електрорушійна сила не змінює свого значення. Вузли схеми позначають номерами  $1, 2, \dots, n$ .

Вхідна інформація про мережу має такі дані: за кожною віткою схеми – вузли  $i$  та  $j$ , що є кінцями вітки, дійсну й уявну частини ( $Z'_{ij}$  та  $Z''_{ij}$ ); за кожним вузлом вмикання генераторів – номер вузла  $i$ , значення опору  $x_i$ , значення уявної та дійсної частини електрорушійної сили ( $E_i'$  та  $E_i''$ ); номери вузлів  $k$  схеми, де виник аварійний режим.

Під час першого етапу початкову схему заміщення мережі потрібно перетворити, змінивши вхідні активні вітки у схемі з опорами  $x_i$  і електрорушійної сили генераторів  $E_i'$  та  $E_i''$  пасивними вітками з тим же опором і еквівалентними джерелами струму. Значення струму еквівалентного джерела обчислюється виразом:

$$I_i = (E_i' + jE_i'')/jx_i. \quad (3.32)$$

Вузлові струми джерел перетвореної схеми заміщення орієнтовані звичайно в тій системі координат, у якій попередньо були визначені перехідні значення електрорушійних сил.

До виникнення аварійного режиму електричний стан мережі можна описати рівнянням:

$$\sum_{j=1}^n Z_{ij} I_j = U_i^{(H)} \quad , \quad (3.33)$$

де  $Z_{ij}$  – елемент матриці з значеннями вузлових опорів;  $I_j$  – вузловий струм (для вузлів ввімкнення генераторів, що дорівнює струму еквівалентного джерела, а для решти вузлів схеми – нулю);  $U_i^{(H)}$  – напруга вузла й схеми в нормальному режимі мережі.

У разі виникнення аварійного режиму у певному вузлі  $k$ , напруга в ньому становитиме  $U_k = 0$ . При цьому виникає додатковий вузловий струм від вузла,  $I_k$ . Для цього вузла можна побудувати рівняння за відомою напругою, яке дає можливість знайти струм у місці виникнення аварійного режиму. Електричний стан мережі за трифазного КЗ у вузлі  $k$  схеми описаний нижче системою лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n Z_{kj} I_j - Z_{kk} I_k = 0 \\ \sum_{j=1}^n Z_{ij} I_j - Z_{ik} I_k = U_i^{(H)} \end{array} \right. \quad , \quad (3.34)$$

де  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $i \neq k$ .

Із системи рівнянь (3.34) визначимо струм КЗ та залишкові напруги у вузлах схеми:

$$I_k^{(3)} = \sum_{j=1}^n Z_{kj} I_j / Z_{kk} = U_i^{(H)} / Z_{kk} \quad (3.35)$$

$$U_i = \sum_{j=1}^n Z_{ij} I_j - Z_{ik} I_k = U_i^{(H)} - Z_{ik} I_k \quad (3.36)$$

де  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $i \neq k$ .

На основі отриманих значень залишкових напруги у вузлах схеми, визначають параметри аварійного режиму в електричній мережі:

струми у вітках перетвореної схеми мережі

$$I_{ij}=(U_i-U_j)/ Z_{ij} \quad (3.37)$$

струм, створений кожним генератором у вихідній схемі мережі,

$$I_{\Gamma i}=(E_i-U_i) / Z_{ij} \quad (3.38)$$

вхідний опір вихідної схеми мережі

$$Z_{\text{вх}i}=E_i/ I_{\Gamma i} \quad (3.39)$$

Розподіливши комплексні величини на дійсні та уявні частини:

$$\begin{aligned} E_i &= E'_i + jE''_i; & U_i &= U'_i + jU''_i; \\ I_i &= I'_i + jI''_i; & Z_{ij} &= Z'_{ij} + jZ''_{ij} \end{aligned}$$

і підставивши їх відповідно до (3.32), (3.33) та (3.35) – (3.39), отримаємо вирази, зручні для програмування та розрахунку на обчислювальній техніці.

Відзначимо, що обчислювальну техніку широко використовують для вирішення завдань, пов'язаних з дослідженнями і розрахунком електромагнітних параметрів аварійних режимів в електричних мережах.

Відтак загальний розв'язок окремої задачі математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних

споживчих потужностей з визначення розрахунку струмів короткого замикання має такий загальний вигляд:

$$Q_{\Pi}(R, I, t) = f_{2\Pi}(U, t) \quad (3.40)$$

Таким чином, розв'язок окремої задачі математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей з визначення розрахунку струмів короткого замикання дозволяє в подальшому застосовувати автоматизовані розрахункові схеми електричних мереж з великою кількістю вузлів та віток, що у свою чергу відповідає наявним складним схемам електричних мереж підприємств, а також електричним схемам у разі застосування глибоких вводів з високою напругою понад, неоднорідності мережі, значного збільшення потужності джерел енергетичної системи, комплексного складу й різкозмінного характеру навантаження та низка інших чинників.

### **3.4. Розв'язування окремої задачі математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей з визначення температури та часу спрацювання плавкого запобіжника**

Загальний розв'язок окремої задачі математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей з визначення температури та часу спрацювання плавкого запобіжника  $Q_{III}(R,I,t)$  спирається на той факт, що методи розрахунку характеристик перехідного процесу аварійного режиму за правилом еквівалентності для струму прямої послідовності можуть бути застосовані для розрахунку перехідного процесу. Періодичну складову струму прямої послідовності аварійного режиму визначають аналогічно, як і періодичну складову струму, але тільки в точці, віддаленій від заданої на певний опір  $Z^{(n)}_{\Delta}$ . Під час розрахунку струму аварійного режиму необхідно використовувати комплексні схеми заміщення.

#### **3.4.1 Розрахунок початкових значень періодичних складових параметрів режиму.**

Процедура з розрахунку початкових значень періодичних складових параметрів режиму має вигляд  $Q'_3(U,t)$ . Схеми заміщення складають загалом для всіх послідовностей: прямої, зворотної та нульової. Параметри схеми заміщення прямої послідовності визначають для моменту часу  $t=0$ . Напряга прямої послідовності в будь-якій точці СЕП завжди нижча, аніж за короткого замикання у тій же точці. До приблизної оцінки ударного струму аварійного режиму можуть не враховувати навантаження. У наближених розрахунках

схему заміщення для зворотної послідовності отримують з такої ж схеми для прямої послідовності, вилучивши е.р.с. та взявши  $Z_{1рез}$ ,  $Z_{2рез}$ . Послідовність обліку початкових значень періодичних складових параметрів режиму:

- 1) складають схеми заміщення, визначаючи параметри еквівалентів елементів (опорів) та е.р.с. джерел;
- 2) перетворюють схеми заміщення, знаходять результуючі опори  $Z_{1рез}$ ,  $Z_{2рез}$ ,  $Z_{0рез}$ ;
- 3) обчислюють за формулою струм прямої послідовності:

$$I_{kA1}^{(n)} = E_{A\Sigma} / (Z_{1рез} + Z_{\Delta}^{(n)}) \quad , \quad (3.41)$$

де індекс (п) означає вид КЗ;  $Z_{\Delta}^{(n)}$  – додатковий опір залежно від виду КЗ;

4) залежно від виду аварійного режиму визначають струми та напруги різних послідовностей;

5) обчислюють розподіл струмів окремих послідовностей у відповідних первинних розрахункових схемах та в разі необхідності враховують зміщення векторів струмів прямої й зворотної послідовностей на відповідні кути за їх трансформації;

б) знаходять фазні струми та напруги для аварійного режиму.

### 3.4.2. Розрахунок параметрів режиму за аварійного режиму.

Процедура з розрахунку параметрів режиму за несиметричного аварійного режиму має такий вигляд:  $Q''_3(U,t)$ . Для встановлення значення періодичної складової струму застосовують типові криві. Якщо в розрахунковій схемі передбачено лише одне джерело (синхронний генератор, компенсатор або групу генераторів, що мають однакові параметри та перебувають в однакових умовах відносно точки):

- 1) знаходять струм прямої послідовності генератора  $I_{\Gamma}''^{(n)}$ ;
- 2) визначають електричну віддаленість точки аварійного режиму від генератора

$$I_{*\Gamma}^{(n)} = I_{\Gamma}''^{(n)} / I_{\Gamma H}, \quad (3.42)$$

де  $I_{\Gamma H}$  – номінальний струм генератора, зведений до ступеня напруги мережі, у якій виник аварійний режим;

- 3) за знайденим значенням (3.42) вибирають відповідну типову криву і для потрібного моменту часу  $t$  визначають відношення:

$$\gamma_t^{(n)} = (I_{\Gamma t}^{(n)} / I_{\Gamma}''^{(n)}); \quad (3.43)$$

- 4) за відношенням  $\gamma_t^{(n)}$  обчислюють шукане значення періодичної складової струму аварійного режиму у момент часу  $t$ :

$$I_{\Gamma t}^{(n)} = \gamma_t^{(n)} I_{\Gamma}''^{(n)}. \quad (3.44)$$

Якщо існує кілька джерел живлення, то доцільно здійснити поділ на дві групи. До однієї потрібно віднести джерела, які близько розташовані від місця (джерела обмеженої потужності), а до другої – віддалені джерела з незмінною напругою на клеммах. Здебільшого аварійний режим може характеризуватися за опором  $x_k$ . Якщо у схемі заміщення для прямої послідовності  $x_{k,1} = 0$ , то в комплексній схемі заміщення як  $x_{k,1}$  буде опір  $x_{\Delta}^{(n)}$ . Для знаходження значень параметрів кола за несиметричних аварійних режимів пропонується наступний алгоритм:

- 1) визначають струм прямої послідовності  $I_{kA}''^{(n)}_{1\Sigma}$ ;
- 2) знаходять струм прямої послідовності в момент часу  $t=0$ ;
- 3) визначають електричну віддаленість джерел за відношенням:  $I_{\Gamma}'' / I_{\Gamma H}$ ;

4) індивідуально введені до розрахункової схеми джерела розбивають на групи за електричною віддаленістю  $I_{\Gamma_i}'' / I_{\Gamma_{ні}} \leq 2$  та  $I_{\Gamma_j}'' / I_{\Gamma_{ні}} > 2$  ;

5) оптимізують комплексну схему відповідно до виду аварійного режиму, де у вигляді трипроменевої зірки у вітку з точкою  $K_1^{(n)}$  увімкнений опір  $x_{\Delta}^{(n)}$ ;

6) визначають сумарний струм прямої послідовності  $I_{\Gamma_j}''^{(n)}_{\Sigma}$  віток  $I_{\Gamma_j}'' / I_{\Gamma_{ні}} > 2$ ;

7) виявляють відношення  $I_{\Gamma_j}''^{(n)}_{\Sigma} / I_{K_A}''^{(n)}_{1\Sigma}$ ;

8) визначають момент часу  $t$  та електричну віддаленість  $I''^{(n)}_{\Gamma\Sigma} / \sum_{j=1}^n I''_{\Gamma_{ні}}$  спершу обчислюють відношення  $I_{\Gamma_t}'' / I''_{\Gamma}$ , а потім, використовуючи допоміжну типову криву  $(I_{пт}'' / I'') = f_2(I_{\Gamma_t}'' / I''_{\Gamma})$  відповідно до отриманого у п.7 співвідношення, визначають:

$$\gamma_t^{(n)} = I_{\Gamma_t}'' / I''_{\Gamma}; \quad (3.45)$$

9) знаходять шукане значення періодичної складової струму аварійного режиму в момент часу  $t$ :

$$I_{пт}^{(n)} = m^{(n)} \gamma_t^{(n)} I_{K_A}''^{(n)}_{1\Sigma} \quad (3.46)$$

### 3.4.3 Розрахунок струму за несиметричних аварійних режимах.

Процедура розрахунку струму за аварійних режимів має такий вигляд:  $Q'''(U, t)$ . Послідовність обчислення з використанням розрахункових кривих має такий вигляд:

1) складають схеми заміщення для різних послідовностей;



2) обчислюють результуючий опір схеми заміщення для заданого виду аварійного режиму;

$$X_{\text{рез}}^{(n)} = X_{1\text{рез}} + X_{\Delta}^{(n)}; \quad (3.47)$$

3) розраховують опір віток живлення (де  $j = 1, \dots, N$ ):

– для заданої  $j$ -ї вітки

$$X_{\text{проз}j}^{(n)} = X_{\text{рез}}^{(n)} S_{\text{H}j} / (C_j U_{\text{б}}^2) \quad (3.48)$$

або

$$X_{\text{проз}j}^{(n)} = X_{\text{брез}}^{(n)} S_{\text{H}j} / (C_j S_{\text{б}}) , \quad (3.49)$$

де  $S_{\text{H}j}$  – номінальна потужність генератора  $j$ -ї вітки;  $C_j$  – коефіцієнт розподілу струму для цієї вітки, який розраховують за допомогою схеми прямої послідовності (у разі розрахунку за загальною змінною  $C=1$ , а під  $S_{\text{H}j}$  слід розуміти загальну потужність джерел живлення у колі);

– опір вітки з джерелом необмеженої потужності обчислюється:

$$X_{\text{GS}}^* = (X_{1\text{рез}}^* + X_{\Delta}^{(n)}) / C_{\text{GS}} , \quad (3.50)$$

де  $C_{\text{GS}}$  – розподіл струму вітки зв'язку з джерелом потужності (якщо таке джерело зв'язане з аварійним режимом кількох віток, то під  $C_{\text{GS}}$  треба розуміти суму відповідних коефіцієнтів струморозподілу);

4) для джерела обмеженої потужності (з  $X_{\text{н роз}}^* < 3$ ) на розрахункових кривих за значенням розрахункового опору  $j$ -ї вітки для заданого часу  $t$

відшуковують відносне значення струму прямої послідовності  $I_{*A1tj}^{(n)}$ ; струм прямої послідовності обчислюють в іменованих одиницях виміру:

$$I_{*A1tj}^{(n)} = I_{*HA1tj}^{(n)} I_{Hj}; \quad (3.51)$$

5) за електричної віддаленості точки КЗ від джерел, а  $x_{*розj}^{(n)} \geq 3$  можна взяти:

$$I_{*A1tj}^{(n)} = I_{Hj} / x_{*н розj}^{(n)} \quad (3.52)$$

або

$$I_{*A1tGS} = I_6 / x_{*6GS}, \quad (3.53)$$

якщо опір  $x_{*6GS}$  джерела виражений у відносних одиницях вимірювання чи за формулою:

$$I_{*A1tGS} = U_6 / (\sqrt{3} x_{GS}), \quad (3.54)$$

опір  $x_{GS}$  іменованій одиницями виміру;

б) значення періодичної складової струму у місці несиметричного аварійного режиму моменту часу  $t$

$$I_{Пт}^{(n)} = I_{кт}^{(n)} = m^{(n)} (\sum_{j=1}^N I_{*A1tj}^{(n)} + I_{*A1tGS}). \quad (3.55)$$

### 3.4.4. Розрахунок струму за аварійного режиму роботи методом спрямлених характеристик.

Процедура з розрахунку струму за несиметричного КЗ методом спрямлених характеристик має такий вигляд:  $Q'''_3(U,t)$ . Процедурі розпочинають зі схем заміщення для прямої, а також зворотної та нульової послідовностей. Заміщення прямої послідовності, генератори синхронні з АРЗ і задають опір індуктивності  $x_t$  та електрорушійною силою,  $E_t$  (напруга генератора), момент обчислення для часу  $t$ . Робота генератора з АРЗ, який працює на зовнішню мережу, порівнюється відносно затискачів генератора опору схеми заміщення з відповідно критичним опором для часу  $t$ .

СЕП з декількома джерелами живлення роботи генераторів для АРЗ вибираємо орієнтовно з такою перевіркою. Порівнюємо значення струмів джерела живлення з критичним значенням струму чи напругу послідовності на клеммах джерела живлення із номінальним значенням (під час режиму збудження  $I_{1Гt} \geq I_{грt}$  або  $U_{1Гt} < U_n$ , а для режиму нормальної напруги –  $I_{1Гt} \leq I_{грt}$  чи  $U_{1Гt} = U_n$ ).

Алгоритм розрахунку струму несиметричного аварійного режиму має таку послідовність:

- 1) обирають режим роботи синхронних генераторів з АРЗ;
- 2) будують схеми заміщення для різних послідовностей;
- 3) замінюють схеми заміщення окремих послідовностей, знаходячи результуючі опори та електрорушійні сили;
- 4) розраховують струм прямої послідовності в точці;
- 5) визначають струми та порівнюють їх з критичними значеннями;
- 6) контролюють вибір режимів: якщо режими генераторів з АРЗ взяті такими, що відповідають нормі, переходять до наступного етапу розрахунку;

7) подальші дії для розрахунку аналогічні як у випадку з розрахунку вхідного значення періодичної складової струму несиметричного аварійного режиму.

Відтак загальний розв'язок окремої задачі математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей з визначення температури та часу спрацювання плавкого запобіжника є відображенням варіації попередньо розглянутих окремих процедур та має наступний загальний вигляд:

$$Q_{III}(R, I, t) = f_{3II}(Q'_3(U, t), Q''_3(U, t), Q'''_3(U, t), Q''''_3(U, t)) \quad (3.56)$$

Таким чином, розв'язування окремої задачі математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей з визначення температури та часу спрацювання плавкого запобіжника дозволяє отримати основні характеристики елемента системи протипожежного захисту електричної мережі шляхом послідовного відпрацювання алгоритму, який складається з чотирьох етапів, а саме: розрахунку початкових значень періодичних складових параметрів режиму, розрахунку параметрів режиму за несиметричного КЗ, розрахунку струму за аварійних режимів та розрахунку струму за несиметричного КЗ методом спрямлених характеристик.

### 3.5. Опис математичної моделі.

Як зазначалось раніше у розділі 3.1, процес протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей описується у вигляді залежності (3.1):

$$\Psi_{III}(T_k, T_F, t_E) = f_{III}(I, R, t);$$

Наслідком подальшої формалізації параметрів є послідовне розв'язування трьох окремих задач з визначення основних характеристик елемента протипожежного захисту, які у свою чергу мають такі загальні вирази, а саме: (3.31), (3.40), (3.56):

$$Q_I(R, I, t) = f_{1\Pi}(Q'_1(U, t), Q''_1(U, t), Q'''_1(U, t));$$

$$Q_{II}(R, I, t) = f_{2\Pi}(U, t);$$

$$Q_{III}(R, I, t) = f_{3\Pi}(Q'_3(U, t), Q''_3(U, t), Q'''_3(U, t), Q''''_3(U, t)).$$

Розв'язування окремої задачі математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей з визначення перехідних процесів у разі короткого замикання передбачає послідовне визначення основних характеристик моделі як в умовах настання короткого замикання у віддалених точках системи електропостачання, так і в умовах комплексного навантаження з підживленням місця короткого замикання.

Розв'язування окремої задачі математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей з визначення розрахунку струмів короткого замикання дозволяє в подальшому застосовувати автоматизовані розрахункові схеми електричних мереж із великою кількістю вузлів та віток.

Розв'язування окремої задачі математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей з визначення температури та часу спрацювання плавкого запобіжника дозволяє отримати основні характеристики елемента системи протипожежного захисту електричної мережі.

Іншими словами, умову отримання розв'язку задачі  $\Omega_{\text{пз}}(T_k, T_F, t_E)$  можна записати у вигляді:

$$\Omega_{\text{пз}}(T_k, T_F, t_E) = f_{\Omega_{\text{пз}}}(Q_I(R, I, t), Q_{II}(R, I, t), Q_{III}(R, I, t)). \quad (3.57)$$

З урахуванням викладеного вище шукана математична модель складається із системи залежностей (3.1), (3.57):

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_{\text{пз}}(T_k, T_F, t_E) = f_{\text{п}}(I, R, t); \\ \Omega_{\text{пз}}(T_k, T_F, t_E) = f_{\Omega_{\text{пз}}}(Q_I(R, I, t), Q_{II}(R, I, t), Q_{III}(R, I, t)) \end{array} \right. \quad (3.58)$$

Таким чином, математична модель протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей являє собою систему з двох аналітичних залежностей. Перша описує залежність основних параметрів елементу системи протипожежного захисту від основних параметрів електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей. Друга дозволяє визначити ефективні параметри елементу системи протипожежного захисту залежно від варіантів розв'язку окремих задач: з визначення перехідних процесів за короткого замикання; з визначення розрахунку струмів короткого замикання; з визначення температури та часу спрацювання плавкого запобіжника.

### Висновки до третього розділу

1. Поле математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей перебуває в

межах, які обумовлені температурою спрацювання елемента системи протипожежного захисту, яка у свою чергу знаходиться між максимальною допустимою робочою температурою з'єднання штепсель – гніздовий контакт і температурою руйнування конструктивних елементів системи протипожежного захисту, та уточнюється, з одного боку, температурою самозаймання матеріалів елементів системи протипожежного захисту, а з іншого боку, – температурою самозаймання інших матеріалів, які контактують або знаходяться поруч з елементом системи протипожежного захисту.

2. Розв'язування окремої задачі математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей з визначення перехідних процесів за короткого замикання передбачає послідовне визначення основних характеристик моделі, по-перше, в умовах настання короткого замикання у віддалених точках системи електропостачання; по-друге, в умовах настання короткого замикання в усталеному аварійному режимі; по-третє, в умовах комплексного навантаження з підживленням місця короткого замикання, що в подальшому дозволяє отримати основні рівняння зв'язку між змінними та незмінними перемінними шуканої математичної моделі.

3. Розв'язування окремої задачі математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей з визначення розрахунку струмів короткого замикання дозволяє в подальшому застосовувати автоматизовані розрахункові схеми електричних мереж із великою кількістю вузлів та віток, що у свою чергу відповідає існуючим наживо складним схемам електричних мереж підприємств, а також електричним схемам у разі застосування глибоких введів з високою напругою, неоднорідності мережі, збільшення потужності джерел живлення системи, комплексного складу і різкозмінного характеру навантаження та низка інших чинників.

4. Розв'язування окремої задачі математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей із визначення температури та часу спрацювання плавкого запобіжника дозволяє отримати основні характеристики елемента системи протипожежного захисту електричної мережі шляхом послідовного відпрацювання алгоритму, який складається з чотирьох етапів, а саме: розрахунку початкових значень періодичних складових параметрів режиму, розрахунку параметрів режиму за несиметричного КЗ, розрахунку струму за аварійних режимів та розрахунку струму за несиметричного КЗ методом спрямлених характеристик.

5. Математична модель протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей являє собою систему з двох аналітичних залежностей. Перша описує залежність основних параметрів елемента системи протипожежного захисту від основних параметрів електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей. Друга дозволяє визначити ефективні параметри елемента системи протипожежного захисту залежно від варіантів розв'язку окремих задач: з визначення перехідних процесів за короткого замикання; з визначення розрахунку струмів короткого замикання; з визначення температури та часу спрацювання плавкого запобіжника.



## РОЗДІЛ 4

### ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕМЕНТУ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ У МІСЦЯХ КОМУТАЦІЇ НАДМІРНИХ СПОЖИВЧИХ ПОТУЖНОСТЕЙ

Вирішувати четверте завдання наукового дослідження з розробки фізичної моделі елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей будемо наступним чином. Спочатку визначимо основні підходи до розроблення фізичної моделі елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей. Наступним етапом здійснимо інтеграцію математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей у фізичну модель елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей. Після чого запропонуємо опис фізичної моделі елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей.

#### **4.1. Визначення основних підходів до розроблення фізичної моделі елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей**

Фізична модель елемента захисту належить до галузі електротехніки, а саме пристроїв комутації в електричних мережах з автоматичним відключенням, що безпосередньо реагують на перевищення номінальної температури.

Місця комутації в електричних мережах можуть надмірно нагріватися і як наслідок ставати джерелом загоряння під час пожеж. Причиною нагрівання є підвищення опору в місці контакту або перевищення допустимого струмового навантаження. Нагрівання внаслідок підвищення перехідного опору призводить до локального нагрівання елементів електричної мережі та може не супроводжуватися спрацюванням апаратів захисту електричних мереж (автоматичних вимикачів, струмових запобіжників).

Відома модель елемента протипожежного захисту з логічним ланцюгом управління, призначена для постійного контролю однієї або всіх розроблених функцій, як-от: відстеження правильної та повної вставки штекера, наявності навантаження, поточного навантаження на розетку й вимірювання температури на виході. Основними елементами моделі з логічним ланцюгом управління є перемикач з електричним керуванням, інтелектуальна схема керування, блок живлення, щонайменше один датчик визначення повного й правильного встановлення електричної вилки. Модель може містити датчик наявності навантаження, датчик поточного навантаження та датчик температури на виході з розетки. Інтелектуальна схема містить мікропроцесор, який обробляє дані з датчиків та здійснює керування роботою перемикача. Датчик температури є термістором, що змінює опір під час зміни температури. Вимикання перемикача здійснюється за допомогою мікропроцесора в разі досягнення термістором певного еталонного значення опору.

Інший фізичний прототип ґрунтується на процесі захисту від перегріву електричної з'єднувальної розетки під час комутації, наприклад, електромобіля з електричною мережею, що від'єднує розетку від електричної мережі у випадку перегріву розетки. Запропонований спосіб передбачає чотири етапи: вимірювання температури розетки, передавання отриманої інформації у спеціальний електричний пристрій, визначення електричним

пристроєм стану перегріву шляхом порівняння з еталонним значенням та зниження значення електричного струму або від'єднання розетки від електричної мережі.

Найбільш близьким фізичним аналогом є електрична розетка з тепловим захистом. Електрична розетка з тепловим захистом складається зі супорту кріплення до монтажної коробки, теплового запобіжника, який розміщено на основі розетки, гвинтових затискачів для дротів, розпірного механізму, гніздового контакту, теплопровідного наповнювача та струмопровідних дротів. Спрацювання теплового запобіжника відбуватиметься за умови нагрівання до певної граничної температури за рахунок тепла, що виділятиметься від гніздового контакту, унаслідок чого електричне коло розмикається та припиняється проходження електричного струму.

Таким чином, запропонований підхід формування фізичної моделі елементу протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей дозволяє врахувати та згодом попередити аварійну ситуацію внаслідок перегрівання електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей. Також з метою однозначного спрацювання елементу протипожежного захисту пропонується перевірка працездатності пристрою, що приєднують до електричної мережі, та самої мережі.

#### **4.2. Інтеграція математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей у фізичну модель елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей**

Для моделювання складної електричної системи, особливо для цілей вивчення перехідних процесів у перемикаючих і аварійних режимах, фізична модель має бути представлена у вигляді відповідної докладної схеми заміни математичних викладок, які є основою математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей, на електричний ланцюг відповідної структури (з урахуванням раніше сформованої у розділі 2 структурно-логічної моделі елемента системи протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей).

Такі вимоги до схем відповідають моделюванню перехідних електротехнічних процесів. Детальне представлення всієї електричної системи не є ефективним способом розв'язання проблеми комп'ютерного моделювання динамічних режимів із точки зору складності одержуваних обчислювальних задач і необхідності використання високопродуктивних, паралельно обчислювальних комп'ютерних засобів, що на практиці не доцільно. Загалом детальне моделювання потрібне лише для відносно невеликих частин реальної системи, тоді як електричні схеми решти компонентів можуть бути представлені відповідними еквівалентними фізичними або комп'ютерними моделями. Проте навіть за наявності відповідної еквівалентної схеми з параметрами, визначеними для основного елемента на підставі випробувань на коротке замикання, її може бути не достатньо для моделювання перехідних процесів через наявність частотнозалежних елементів. У той же час, високо частотні збурення повинні бути адекватно відтворені, що вимагає використання малих кроків

моделювання (планування експериментів з урахуванням малих кроків змін вхідних параметрів). Поєднання малих кроків інтегрування та складності моделі системи накладає жорсткі вимоги до ресурсів комп'ютерної мережі з обчислення натурних випробувань, зокрема центрального процесора та об'єму оперативної пам'яті, що використовується для розрахунків. Завдання ще більше ускладнюється, якщо система містить велику кількість елементів із розподіленими параметрами. Одним зі способів зменшення споживання обчислювальних ресурсів є заміна частин системи обчислювальними ефективними моделями.

Методом побудови еквівалентних моделей на підставі вимірювань та імітаційного моделювання є комп'ютерне моделювання чи то на підставі вимірювань, отриманих у натурних експериментах, чи то на підставі детальних математичних моделей, формування натурних фізичних моделей перехідних процесів. Для визначення параметрів еквівалентної моделі використовуються методи ідентифікації, підґрунтям яких є теорія динамічних систем, у якій ідентифікація параметрів виконується за допомогою алгоритму найменших квадратів з адаптованим розміром часового кроку. Перед початком моделювання коефіцієнти моделі замінюються початковим наближенням. Початкова система повторно ідентифікується до тих пір, поки штрафна функція не буде мінімізована і всі параметри системи не будуть ідентифіковані.

У нашому випадку інтеграція математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей у фізичну модель елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей відбувається наступним чином (табл. 4.1.):

Таблиця 4.1. Інтеграція моделей протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей

Елемент структурно-логічної моделі	Вираз математичної моделі	Елемент фізичної моделі, який досліджується, та група експериментів
Блок «визначення перехідних процесів за короткого замикання»	$QI(R, I, t) = f1п(Q'1(U,t), Q''1(U,t), Q'''1(U,t))$	<p>Елемент протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей із тепловим захистом та світловим індикатором</p> <p>I група експериментів</p>
Блок «визначення величини струмів короткого замикання»	$QII(R, I, t) = f2п(U,t)$	<p>Елемент протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей з тепловим захистом та світловим індикатором</p> <p>IV група експериментів</p>

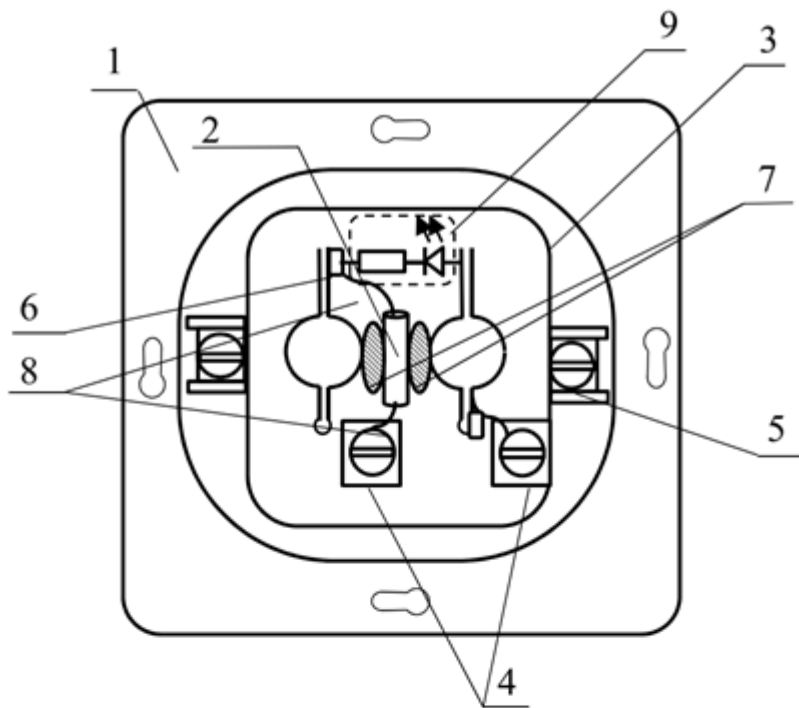
Блок «визначення температури та часу спрацювання плавкого запобіжника»	$Q_{III}(R, I, t) = f_{III}(Q'_{III}(U, t), Q''_{III}(U, t), Q'''_{III}(U, t))$	Елемент протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей з тепловим захистом та світловим індикатором II група експериментів III група експериментів
--	---	---

Таким чином, інтеграція математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей у фізичну модель елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей дозволяє визначити необхідну послідовність та параметри натурних випробувань з метою перевірки достовірності отриманих моделей.

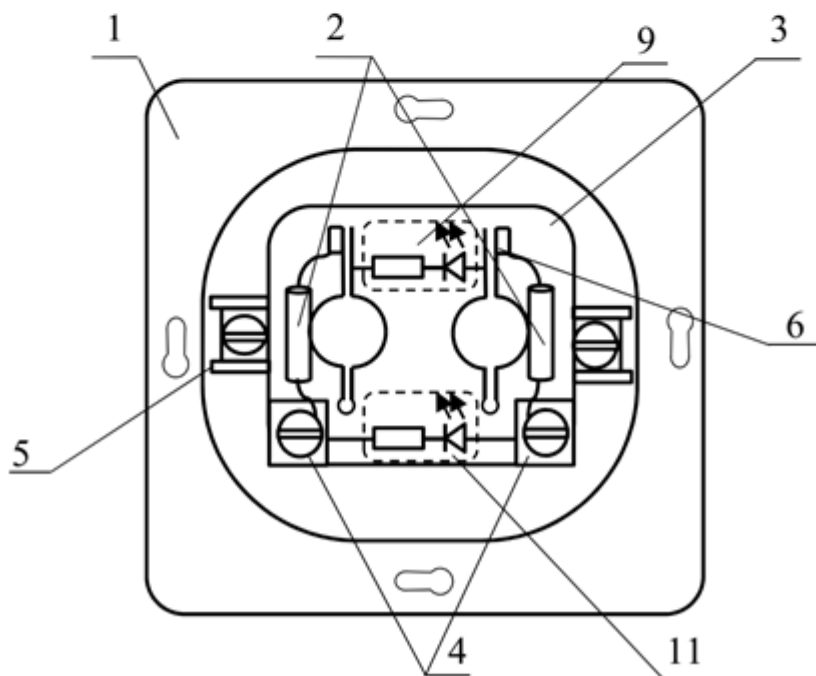
#### **4.3. Опис фізичної моделі елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей**

В основу фізичної моделі елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей покладено припущення створити елемент на базі розеткового модуля з функцією розмикання електричного кола за умови перегрівання з'єднання штепсель-

розетка з наявністю індикації працездатності чи спрацювання теплового запобіжника.

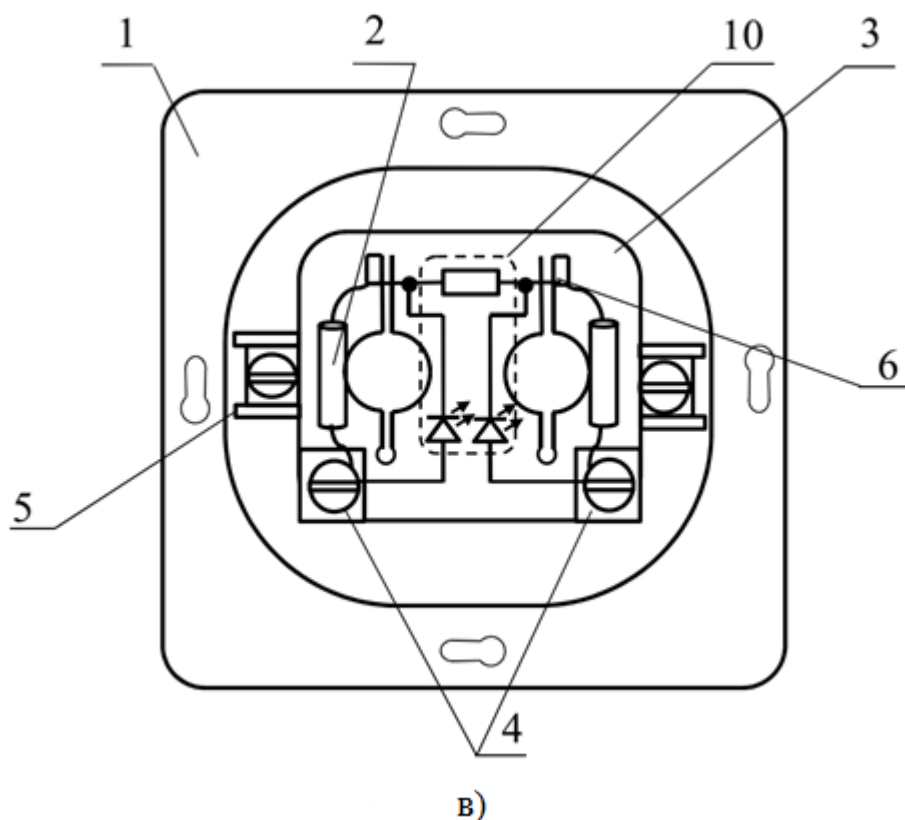


a)



б)





**Рисунок 4.1. Графічний опис фізичної моделі в різному варіаційному виконанні (а-в).**

Поставлена задача розв'язується шляхом використання світлових індикаторів, що змінюватимуть свій стан після спрацювання теплового запобіжника, який дотикається до струмопровідних пластин розетки.

Варіанти виконання різних допустимих реалізацій схем електричної розетки з тепловим захистом та світловими індикаторами відображені на рис. 4.1. (а, б, в). Креслення та опис виконання та використання електричної розетки з тепловим захистом та світловими індикаторами стану не обмежують заявленої фізичної моделі.

Фізична модель елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей із тепловим захистом та світловими індикаторами складається зі супорту кріплення до монтажної коробки 1, теплового запобіжника 2, який розміщено на основі розетки 3, гвинтових затискачів для дротів 4, розпирного механізму 5, гніздового

контакту 6, теплопровідного наповнювача 7, струмопровідних дротів 8, світлового індикатора працездатності теплового запобіжника 9, світлового індикатора спрацювання теплового запобіжника 10 та світлового індикатора наявності електричного струму в мережі 11.

Елемент протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей із тепловим захистом та світловим індикатором працює наступним чином. Теплові запобіжники 2 дротами 8 з'єднують із затискачами дротів 4 з одного боку та гніздового контакту 6 з іншого та розміщують таким чином, щоб він безпосередньо або через теплопровідний наповнювач 7 дотикався до гніздового контакту 6. Світловий індикатор працездатності теплового запобіжника 9 приєднують до гніздових контактів 6. Світловий індикатор спрацювання теплового запобіжника 10 приєднують до гніздових контактів 6 та затискачів дротів 4. Світловий індикатор наявності електричного струму в мережі 11 та струмопровідні дроти електричної мережі приєднують до затискачів дротів 4. За допомогою супорту кріплення 1 та / або розпірного механізму 5 фіксують у монтажній коробці.

Під час нормального режиму роботи елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей із тепловим захистом виникає електричне коло, що включає електричний дріт мережі живлення, затискачі 4, теплові запобіжники 2, дроти 8, гніздові контакти 6, світловий індикатор працездатності теплового запобіжника 9, світловий індикатор спрацювання теплового запобіжника 10 та світловий індикатор наявності електричного струму в мережі 11. Після спрацювання теплового запобіжника 2 за рахунок тепла, що виділятиметься від гніздового контакту 6, електричне коло розмикається. У випадку використання конструкції рис. 4.1. (а) припиняється робота світлового індикатора працездатності теплового запобіжника 9. У випадку використання конструкції елемента на рис. 4.1. (б) припиняється робота світлового

індикатора працездатності теплового запобіжника 9 та продовжується робота світлового індикатора наявності електричного струму в мережі 11. У випадку використання схеми рис. 4.1. (в) робота світлового індикатора спрацювання теплового запобіжника 10 розпочинається після спрацювання теплового запобіжника 2.

Зміна режиму роботи світлового індикатора дозволить користувачу зробити висновок про спрацювання теплового запобіжника, що вказуватиме на необхідність проведення відповідних кваліфікованих робіт із заміни або відновлення розетки та штепселя приладу.

Таким чином, фізична модель елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей спирається на процес розмикання електричного кола за умови перегрівання з'єднання в місцях надмірних споживчих потужностей за умови постійної візуалізації світлової індикації працездатності чи спрацювання теплового запобіжника елемента протипожежного захисту.

### **Висновки до четвертого розділу**

1. Запропонований підхід формування фізичної моделі елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей дозволяє врахувати та згодом попередити аварійну ситуацію внаслідок перегрівання електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей. Також для однозначного спрацювання елемента протипожежного захисту пропонується перевірка працездатності пристрою, що приєднують до електричної мережі та самої мережі.

2. Інтеграція математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей у фізичну модель елемента протипожежного захисту електричних мереж у

місцях надмірних споживчих потужностей дозволяє визначити необхідну послідовність та параметри натурних випробувань з метою перевірки достовірності отриманих моделей.

3. Фізична модель елемента протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей спирається на процес розмикання електричного кола за умови перегрівання з'єднання в місцях надмірних споживчих потужностей та постійної візуалізації світлової індикації працездатності чи спрацювання теплового запобіжника елемента протипожежного захисту.

## РОЗДІЛ 5

### ПЕРЕВІРКА ДОСТОВІРНОСТІ РОЗРОБЛЕНИХ МОДЕЛЕЙ ТА ВАРІАНТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ

Вирішувати п'яте завдання дисертаційного дослідження з перевірки достовірності розроблених моделей будемо наступним чином. Спочатку дамо опис лабораторної установки й методики проведення експериментів з її використанням. Потім розглянемо результати експериментів, виконаних за різних умов електричного навантаження захисного елемента. Потім проаналізуємо отримані результати.

#### **5.1. Опис лабораторної установки й методики проведення експериментів з її використанням**

Джерело живлення BVP TFT 30V 50A – це імпульсний перетворювач напруги 220°В, 50 Гц у постійну вихідну регульовану напругу до 30°В, з максимально регульованим струмом до 50°А. Імпульсне джерело живлення постійного струму BVP TFT 30V 50A.

Робочі умови експлуатації:

- напруга мережі живлення: 220°В, 50°Гц;
- температура навколишнього середовища: від +5 до +40°С;
- відносна вологість повітря: не більше 90% при температурі +25°С;
- атмосферний тиск: 84 - 106.7 кПа.

Джерело живлення призначене для забезпечення стабільною живильною напругою та струмом електронних пристроїв під час проєктування, виробництва, випробування й ремонту радіоелектронної

апаратури, електронних та електричних виробів. Відображення вихідної інформації на TFT дисплеї дає змогу одночасно побачити максимум інформації про вихідні параметри джерела живлення (ліміт струму й напруги, вихідне значення струму й напруги, поточне значення таймера й лічильника). Невеликі габарити за відносно високої потужності, стабільність параметрів, можливість безперервної роботи на повній потужності джерела живлення дають змогу використовувати його в багатьох промислових галузях, зокрема й для живлення гальванічних ванн. Джерело живлення перетворює мережеву напругу 220°В у постійну напругу до 30°В і струм на вихідних клеммах до 50°А. Конструктивно джерело виконано на чотирьох друкованих платах і розміщене в металевому корпусі. Для забезпечення нормального теплового режиму всередині корпусу встановлено продувний вентилятор, швидкість роботи якого залежить від температурного режиму радіатора джерела. У разі перегрівання в системі охолодження відбувається аварійне вимкнення джерела живлення, що відобразатиметься сигналізацією перегріву – почергове миготіння червоним і зеленим кольором світлодіодів на передній панелі. Для виходу на нормальний режим роботи після охолодження радіатора, необхідно перезапустити джерело вимикачем мережевої напруги "POWER", що знаходиться на задній панелі джерела. У разі частого вимкнення джерела необхідно перевірити справність роботи продувного вентилятора на задній панелі, ступінь забруднення радіатора панелі, ступінь забруднення радіатора, наявність добре вентиляваного об'єму навколо джерела. вентиляваного об'єму навколо джерела живлення. Джерело живлення може перебувати в режимі стабілізації тільки одного з параметрів - напруги або струму. Це залежить від установлених лімітів напруги та струму, а також від параметрів під'єданого навантаження. Якщо в процесі роботи змінити параметри навантаження або ліміти напруги чи струму, то перемикання режимів стабілізації відбуватиметься автоматично.

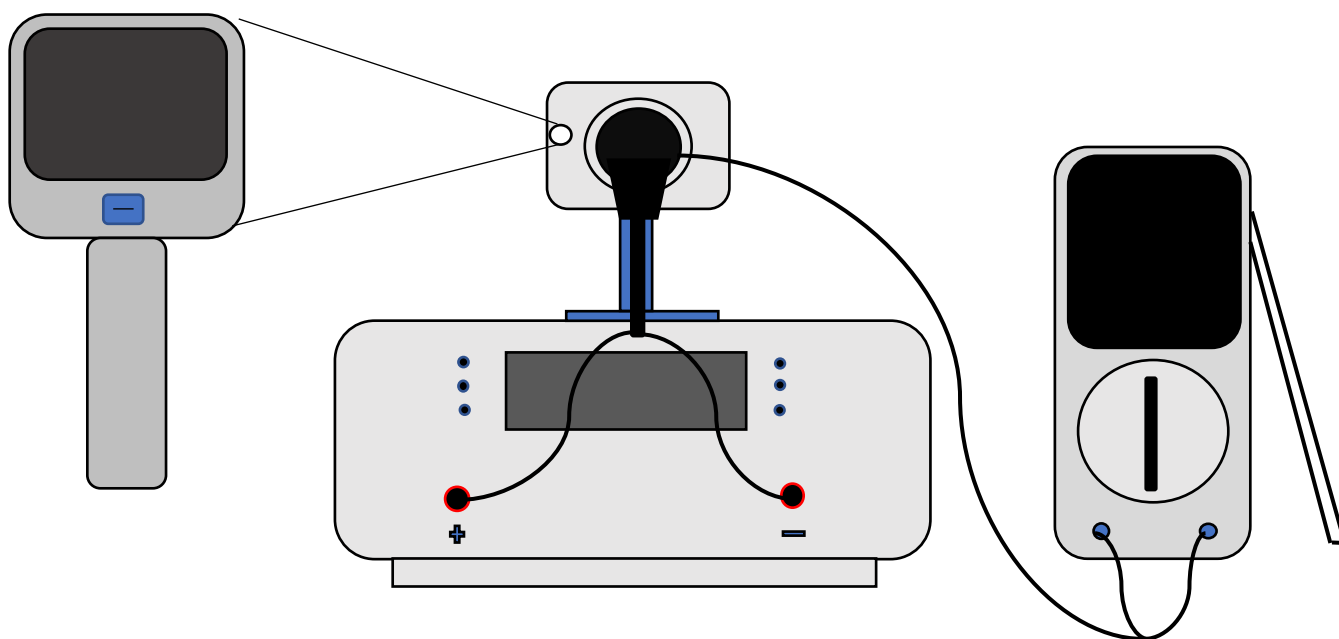
На роботу джерела живлення в режимі стабілізації напруги вказує світлодіод зеленого кольору "Constant Voltage"(C.V.)



**Рисунок 5.1. Лабораторна установка з дослідження умов електричного навантаження захисного елемента.**

Методика проведення експериментів з використанням лабораторної установки BVP TFT 30V 50A передбачала виконання такого порядку дій. За допомогою лабораторної установки (Модуля управління) було проведено 8 серій дослідів. Було використано два дослідних зразка: розетка зовнішня одинарна фірми (*Svetopribor*) з тепловим запобіжником та розетка без теплового запобіжника рис. 4.5-5.5. Також використовувалось два види штепселів: окислений штепсель та нормальний штепсель рис. 5.2-5.3. Заміри температурних значень відбувались за допомогою тепловізора FLIR K2 і

мультиметра UNI-T із штатною термопарою. Час вимірювався за допомогою секундоміра звичайного.



**Рисунок 5.2. Схема підключення та проведення досліду**

За допомогою лабораторної установки (Модуля управління) ми поступово задавали силу струму  $6^{\circ}\text{A}$ ,  $10^{\circ}\text{A}$ ,  $16^{\circ}\text{A}$  з періодами в 0, 1, 5, 10, 60 хвилин, закріпивши електричну розетку зі штепселем на спеціальному штативі, спостерігали й заміряли як відбувалось нагрівання контактних з'єднань, а також самої основи розетки. Експерименти проводились у такій послідовності:

1. Елемент електричного навантаження зі справним контактним з'єднанням розетки та задовільним штепселем;
2. Елемент електричного навантаження з окисленим штепселем та справним контактним з'єднанням розетки;



3. Елемент електричного навантаження із задовільним штепселем та розігнутими контактними з'єднаннями розетки;
4. Елемент електричного навантаження з окисленим штепселем та розігнутими контактними з'єднаннями розетки;
5. Елемент електричного навантаження розетки із захистом та задовільним штепселем;
6. Елемент електричного навантаження розетки із захистом та окисленим штепселем;
7. Елемент електричного навантаження розетки із захистом та розігнутим контактом і задовільним штепселем;
8. Елемент електричного навантаження розетки з тепловим захистом та розігнутим контактом і окисленим штепселем.

Заміри температури проводили за допомогою тепловізора FLIR K2 на відстані 30 сантиметрів від розетки, а також мультиметра зі штатною термопарою, яка була встановлена безпосередньо контактах розетки. Таким чином, лабораторна установка електричного навантаження захисного елементу і розроблена методика проведення експериментів з її використанням дозволяють за допомогою низки експериментів перевірити центральну гіпотезу, покладену в основу розроблених структурно логічної, фізичної та математичної моделей.

## 5.2. Результати експериментів, виконаних із використанням лабораторної установки

Обладнання, яке залучалося до проведення експериментальної частини роботи, наведено на рис. 5.3 –5.6.

Перший штепсель (рис 5.3.), який використано для проведення досліджень, згідно з маркуванням розрахований на робочу силу струму до 16°А та напругу до 250°В. Штепсель призначений для роботи в мережі змінного струму із наявним провідником заземлення.



**Рисунок 5.3. Вигляд обладнання, задіяного в експерименті (нормальний штепсель).**

Корпус та ізоляція дротів виготовлені з полівінілхлориду. За зовнішнім оглядом контактні частини чисті, без ознак корозії або зношення, забезпечують надійний контакт із розеткою. Матеріал контактів – латунь із покриттям нікелем. Покриття не містило ознак пошкоджень та корозії. Діаметр циліндричних контактів, виміряний за допомогою штангенциркуля, становив 6 мм.

Штепсель містить три виводи. Два з них призначені для приєднання до нейтрального та фазного провідників, третій для приєднання до системи заземлення. Під час експериментів використано лише виводи, призначені для приєднання до фазного та нейтрального провідників.

Другий штепсель (рис 5.3.), який використано для проведення досліджень, не містив маркування. Штепсель призначений для роботи в мережі змінного струму. Приєднання заземлюючого провідника не передбачено.



**Рисунок 5.4. Вигляд обладнання, задіяного в експерименті (окислений штепсель).**

Корпус та ізоляція дротів виготовлені з полівінілхлориду. За зовнішнім оглядом контактні частини мають відкладення окислів на поверхні.

Штепсель містить два виводи, призначені для приєднання до нейтрального та фазного провідників, які було використано під час приєднання до джерела живлення дослідної установки. Діаметр контактів - 5°мм.

На рисунку 5.5. зображено першу розетку, яку було використано в експериментальному дослідженні. Під час експерименту розетка використовувалася без кришки з метою контролю температури окремих її елементів за допомогою тепловізора та мультиметра з термопарою. Розетка містить ознаки перегрівання, які виникли в ході експериментів, у вигляді деформації матеріалу основи та корпусу.



**Рисунок 5.5. Вигляд обладнання, задіяного в експерименті (розетка без температурного запобіжника).**

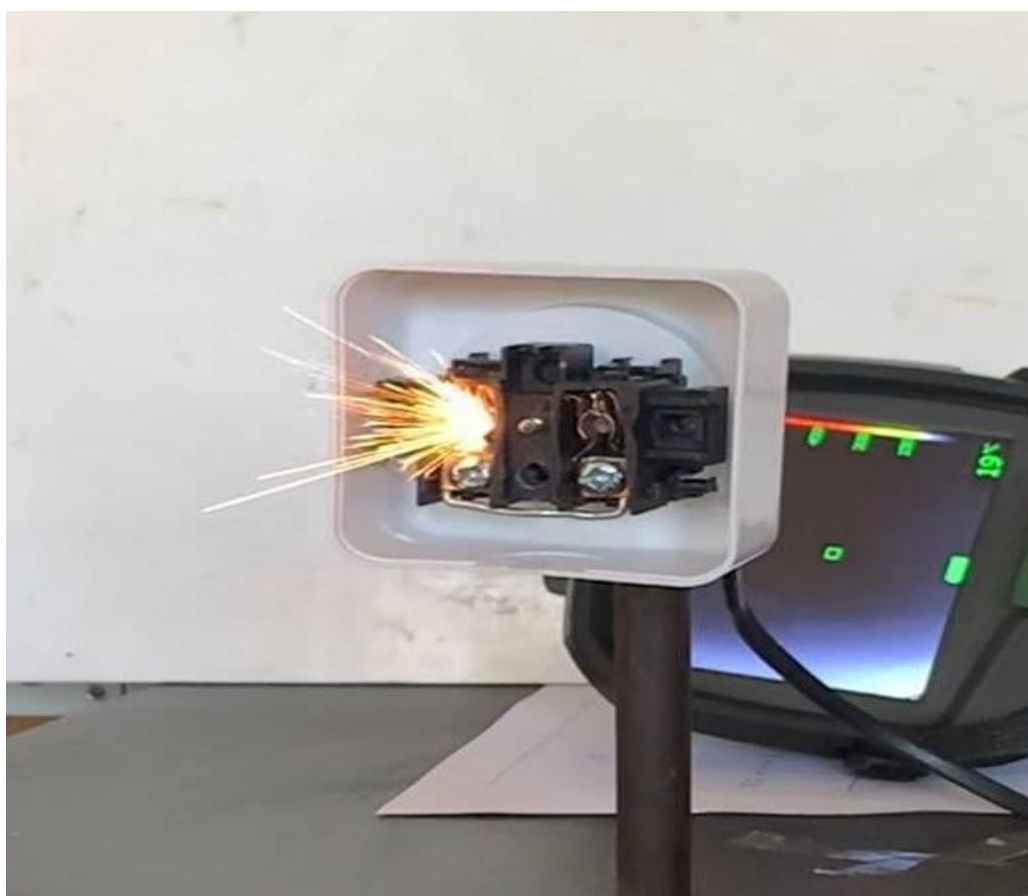
Іншу розетку (рис 5.6.) було обладнано двома температурними запобіжниками.

Оскільки приєднання до джерела живлення виконано за допомогою дротів штепселя, у розетці встановлено шунтуючий провідник, приєднаний до температурних запобіжників за допомогою гвинтового з'єднання. З іншого боку температурні запобіжники приєднано до контактів розетки теж за допомогою гвинтового з'єднання. Корпус запобіжника безпосередньо доторкався до контакту розетки в місці встановлення штепселя.



**Рисунок 5.6. Вигляд обладнання, задіяного в експерименті (розетка з тепловим захисним елементом).**

Під час експерименту моделювались процеси електричного нагрівання елементу конструкції та захисту (рис. 5.7.). У ході проведення експериментів у момент комутації спостерігалися іскріння, які могли б спровокувати небезпечні явища. Передумовою їх виникнення були ослаблення контакту розетки, наявність окислів на поверхні штепселя або з'єднання чи роз'єднання штепселя та розетки.



**Рисунок 5.7. Моделювання процесу електричного навантаження та іскріння за неналежного контакту**

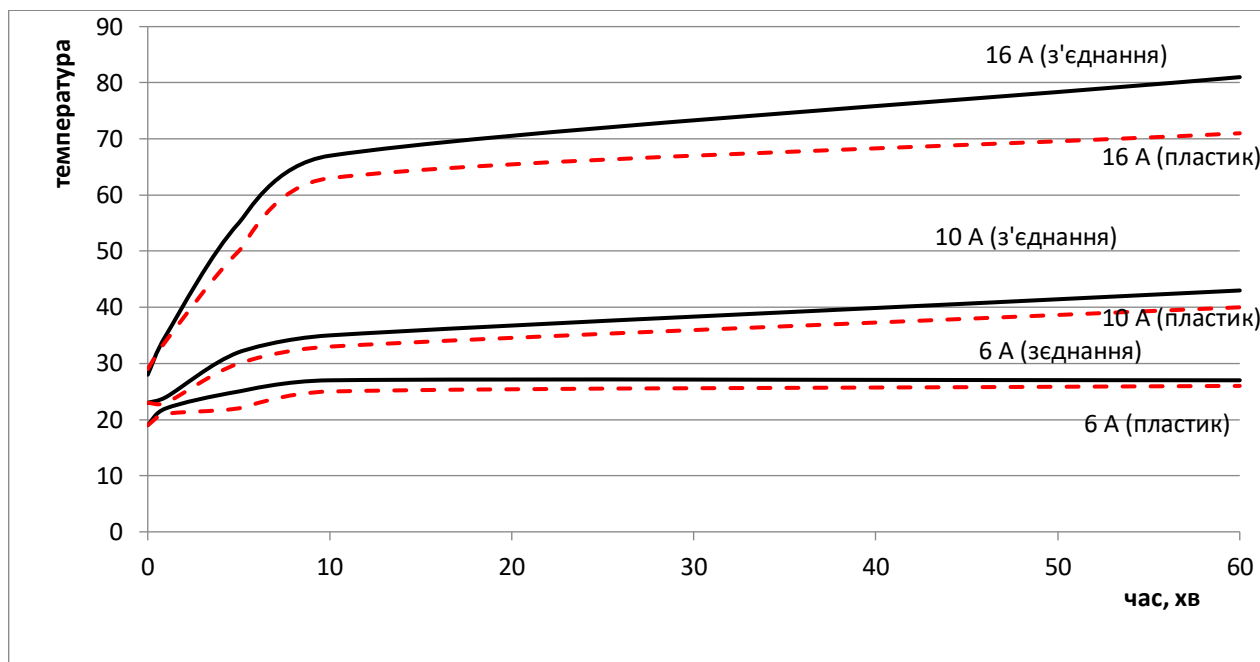
**5.2.1. Перша серія експериментів з елементом електричного навантаження зі справним контактним з'єднанням розетки та задовільним штепселем**

Результати першої серії експериментів наведено у таблиці 5.1. та на рис. 5.8., 5.9.

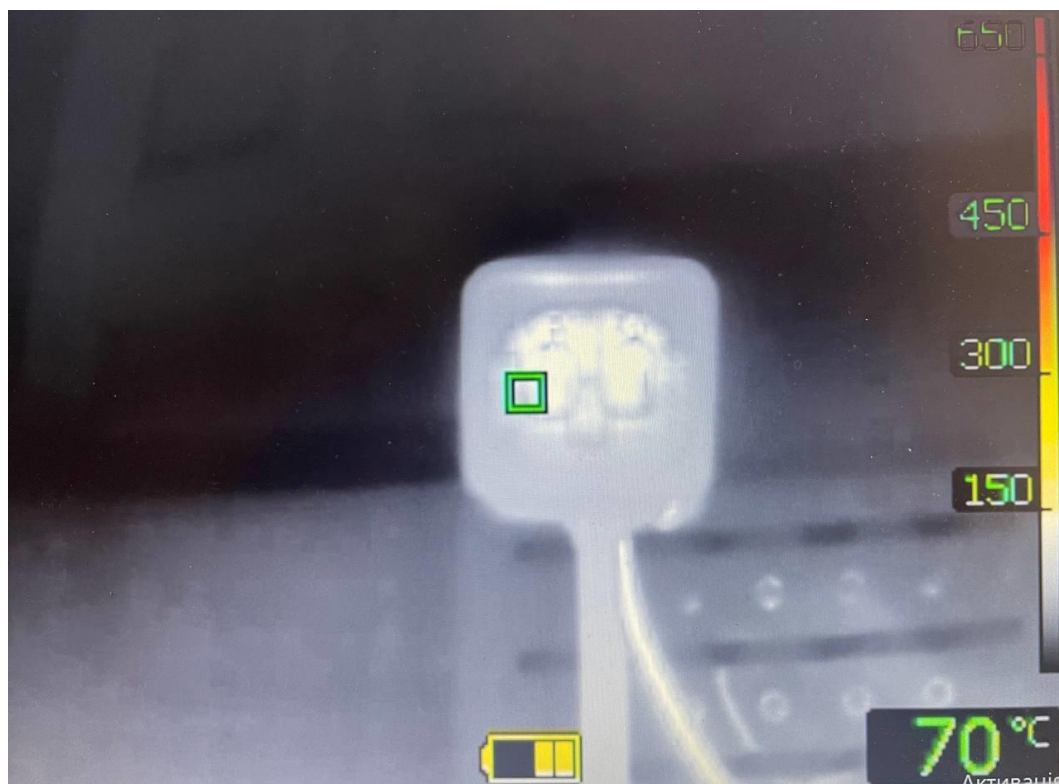
Таблиця 5.1. Результати першої серії експериментів

Сила струму, А	Час, хв	Напруга, В	Температура нагрівання, °С	
			місця з'єднання	пластик
6	0	0	19	19
	1	0,19	22	21
	5	0,21	25	22
	10	0,22	27	25
	60	0,23	27	26
10	0	0	23	23
	1	0,36	24	23
	5	0,38	32	30
	10	0,39	35	33
	60	0,41	43	40
16	0	0	28	29
	1	0,61	35	34
	5	0,69	55	50
	10	0,71	67	63
	60	0,72	81	71





**Рисунок 5.8. Динаміка температурних значень в експериментах з елементом електричного навантаження зі справним контактним з'єднанням розетки та задовільним штепселем.**



**Рисунок 5.9. Розподіл температури в контрольному елементі за нормальних умов експлуатації.**

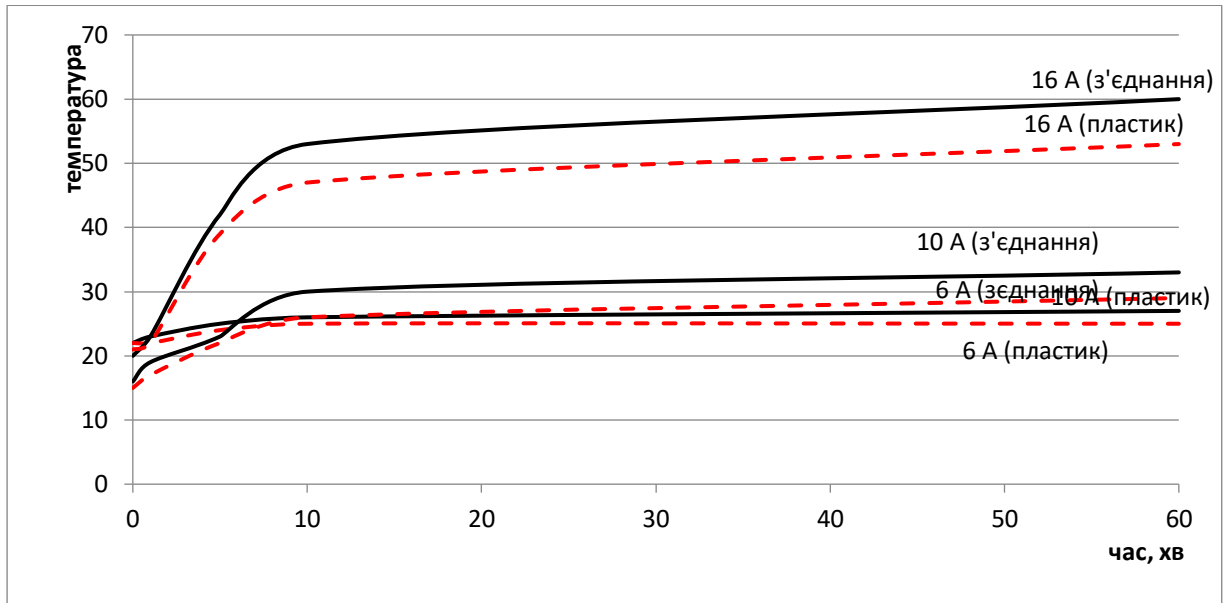


**5.2.2. Друга серія експериментів з елементом електричного навантаження з окисленим штепселем та справним контактним з'єднанням розетки.**

Результати другої серії експериментів наведено в таблиці 5.2. та на рис. 5.10., 5.11.

Таблиця 5.2. Результати другої серії експериментів

Сила струму, А	Час, хв	Напруга, В	Температура нагрівання, °С	
			місця з'єднання	пластик
6	0	0	22	22
	1	0,22	23	22
	5	0,22	25	24
	10	0,22	26	25
	60	0,23	27	25
10	0	0	16	15
	1	0,4	19	17
	5	0,41	23	22
	10	0,41	30	26
	60	0,42	33	29
16	0	0	20	21
	1	0,7	23	22
	5	0,77	42	39
	10	0,79	53	47
	60	0,79	60	53



**Рисунок 5.10.** Динаміка температурних значень в експериментах з елементом електричного навантаження з окисленим штепселем та справним контактним з'єднанням розетки.



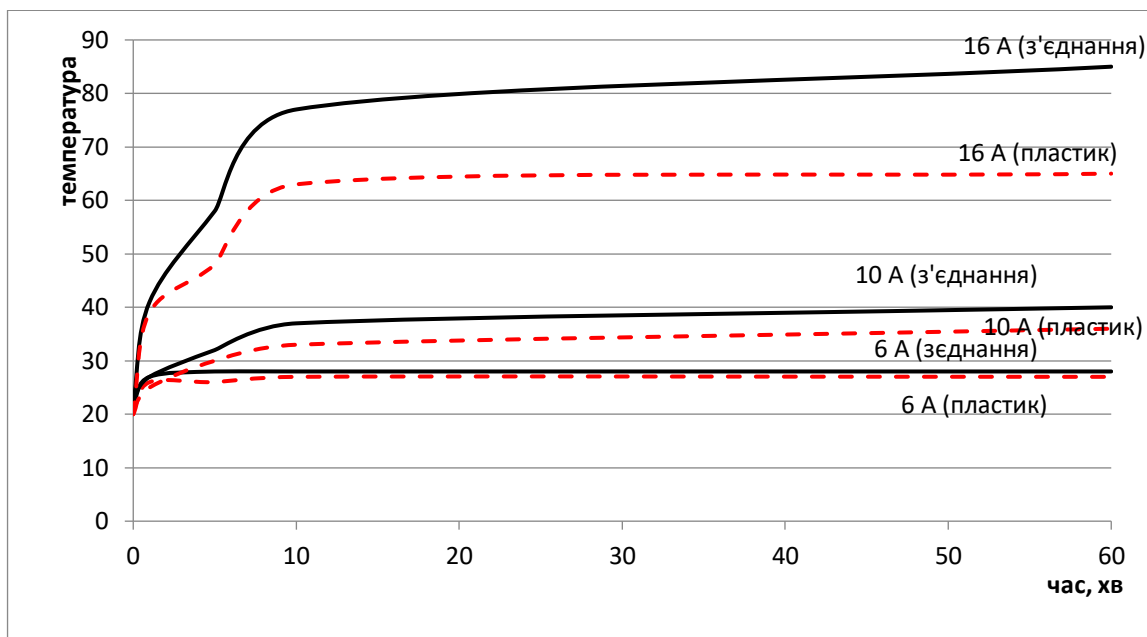
**Рисунок 5.11.** Розподіл температури в контрольному елементі електричного навантаження з окисленим штепселем та справним контактним з'єднанням розетки.

**5.2.3. Третя серія експериментів з елементом електричного навантаження із задовільним штепселем та розігнутими контактними з'єднаннями розетки.**

Результати третьої серії експериментів наведено в таблиці 5.3. та на рис. 5.12., 5.13,

Таблиця 5.3. Результати третьої серії експериментів

Сила струму, А	Час, хв	Напруга, В	Температура нагрівання, °С	
			місця з'єднання	пластик
6	0	0	22	20
	1	0,18	27	26
	5	0,18	28	26
	10	0,18	28	27
	60	0,19	28	27
10	0	0	23	21
	1	0,32	27	25
	5	0,33	32	30
	10	0,33	37	33
	60	0,34	40	36
16	0	0	22	20
	1	0,6	41	39
	5	0,64	58	48
	10	0,67	77	63
	60	0,68	85	65



**Рисунок 5.12.** Динаміка температурних значень в експериментах з елементом електричного навантаження із задовільним штепселем та розігнутими контактними з'єднаннями розетки.



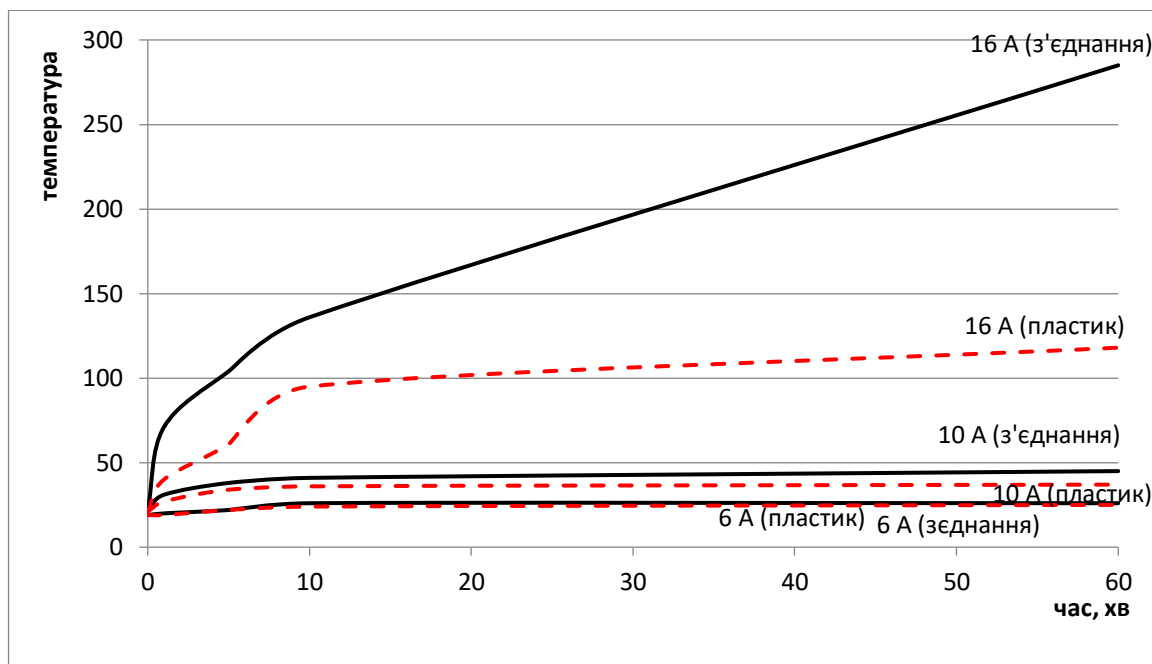
**Рисунок 5.13.** Розподіл температури в контрольному елементі з елементом електричного навантаження із задовільним штепселем та розігнутими контактними з'єднаннями розетки

#### 5.2.4. Четверта серія експериментів з елементом електричного навантаження з окисленим штепселем та розігнутими контактними з'єднаннями розетки

Результати четвертої серії експериментів наведено у таблиці 5.4. та на рис. 5.14., 5.15.

Таблиця 5.4. Результати четвертої серії експериментів

Сила струму, А	Час, хв	Напруга, В	Температура нагрівання, °С	
			місця з'єднання	пластик
6	0	0	19	19
	1	0,23	20	19
	5	0,24	22	22
	10	0,24	26	24
	60	0,24	26	25
10	0	0	22	21
	1	0,44	31	27
	5	0,44	38	34
	10	0,44	41	36
	60	0,45	45	37
16	0	0	22	21
	1	0,96	71	40
	5	0,99	104	61
	10	1.02	136	95
	60	1.09	285	118



**Рисунок 5.14.** Динаміка температурних значень в експериментах з елементом електричного навантаження з окисленим штепселем та розігнутими контактними з'єднаннями розетки.



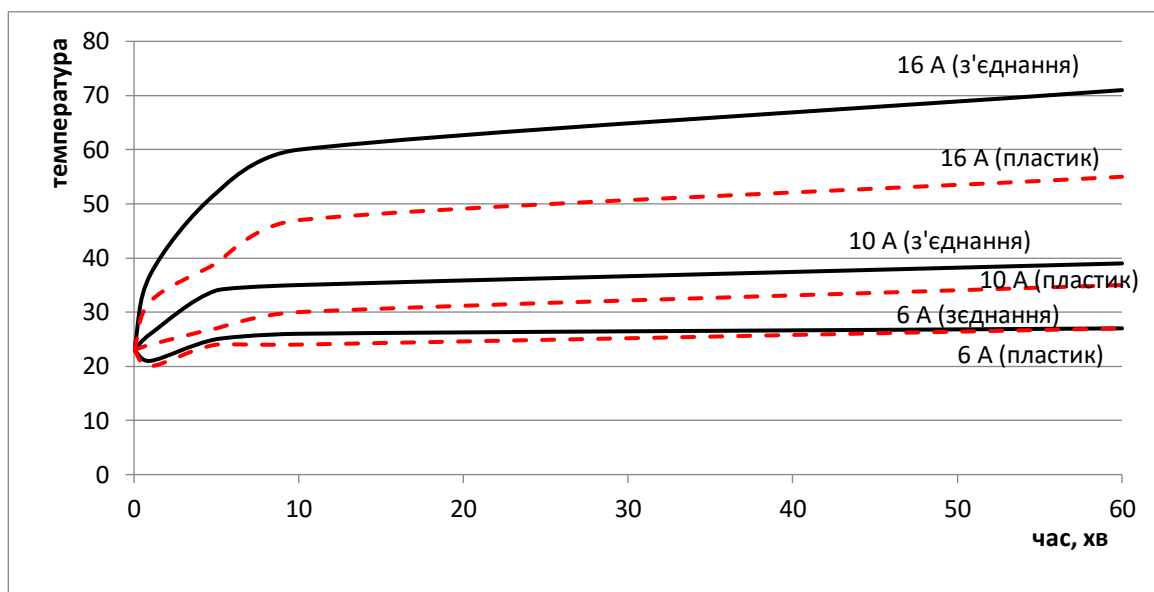
**Рисунок 5.15.** Розподіл температури в контрольному елементі електричного навантаження з окисленим штепселем та розігнутими контактними з'єднаннями розетки.

**5.2.5. П'ята серія експериментів з елементом електричного навантаження розетки із захистом та задовільним штепселем.**

Результати п'ятої серії експериментів наведено у таблиці 5.5. та на рис. 5.16., 5.17.

Таблиця 5.5. Результати п'ятої серії експериментів

Сила струму, А	Час, хв	Напруга, В	Температура нагрівання, °С	
			місця з'єднання	пластик
6	0	0	23	23
	1	0,17	21	20
	5	0,17	25	24
	10	0,17	26	24
	60	0,17	27	27
10	0	0	23	23
	1	0,32	26	24
	5	0,33	34	27
	10	0,33	35	30
	60	0,34	39	35
16	0	0	23	23
	1	0,54	37	32
	5	0,61	52	39
	10	0,64	60	47
	60	0,67	71	55



**Рисунок 5.16. Динаміка температурних значень в експериментах з елементом електричного навантаження розетки із захистом та задовільним штепселем.**



**Рисунок 5.17. Розподіл температури в контрольному елементі електричного навантаження розетки із захистом та задовільним штепселем.**

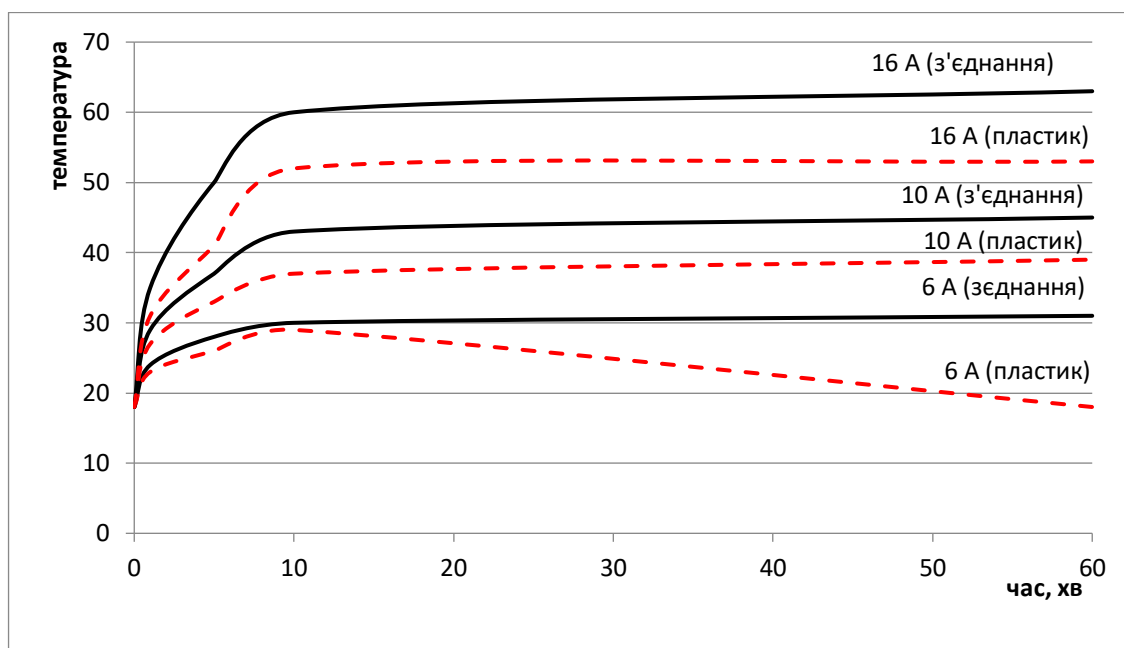


**5.2.6. Шоста серія експериментів з елементом електричного навантаження розетки із захистом та окисленим штепселем.**

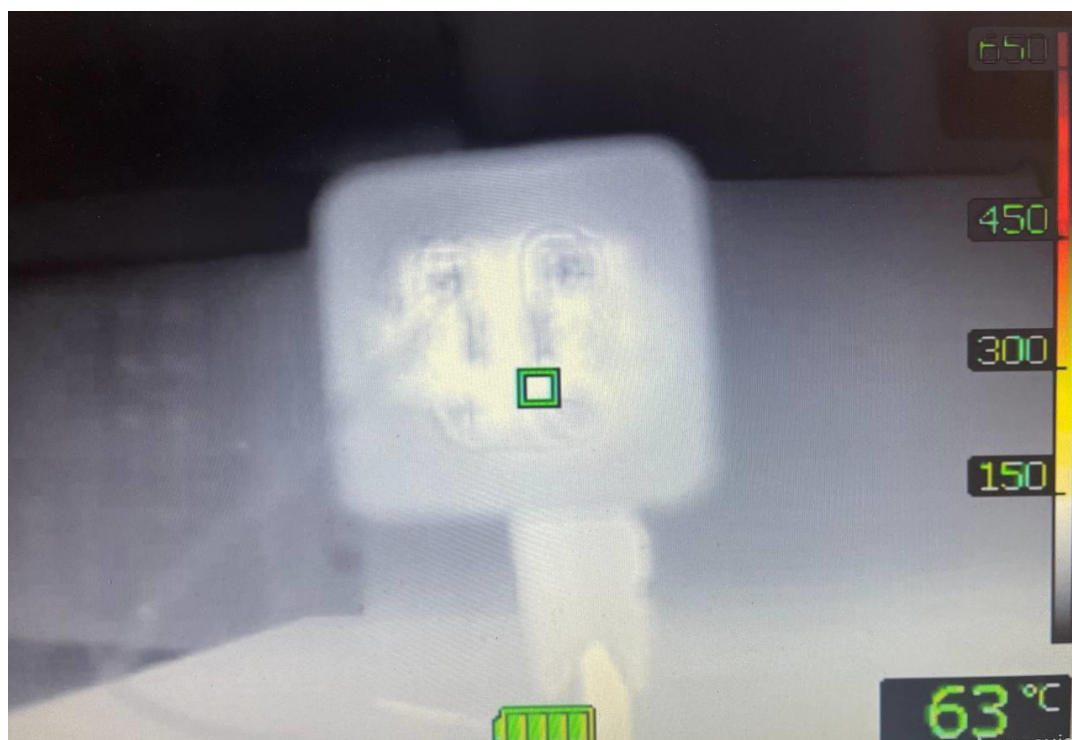
Результати шостої серії експериментів наведено в таблиці 5.6. та на рис. 5.18., 5.19.

Таблиця 5.6. Результати шостої серії експериментів

Сила струму, А	Час, хв	Напруга, В	Температура нагрівання, °С	
			місця з'єднання	пластик
6	0	0	18	18
	1	0,26	24	23
	5	0,27	28	26
	10	0,27	30	29
	60	0,27	31	18
10	0	0	18	18
	1	0,47	29	27
	5	0,48	37	33
	10	0,48	43	37
	60	0,49	45	39
16	0	0	18	18
	1	0,74	35	31
	5	0,78	50	41
	10	0,79	60	52
	60	0,79	63	53



**Рисунок 5.18.** Динаміка температурних значень у контрольному елементі електричного навантаження розетки із захистом та окисленим штепселем.



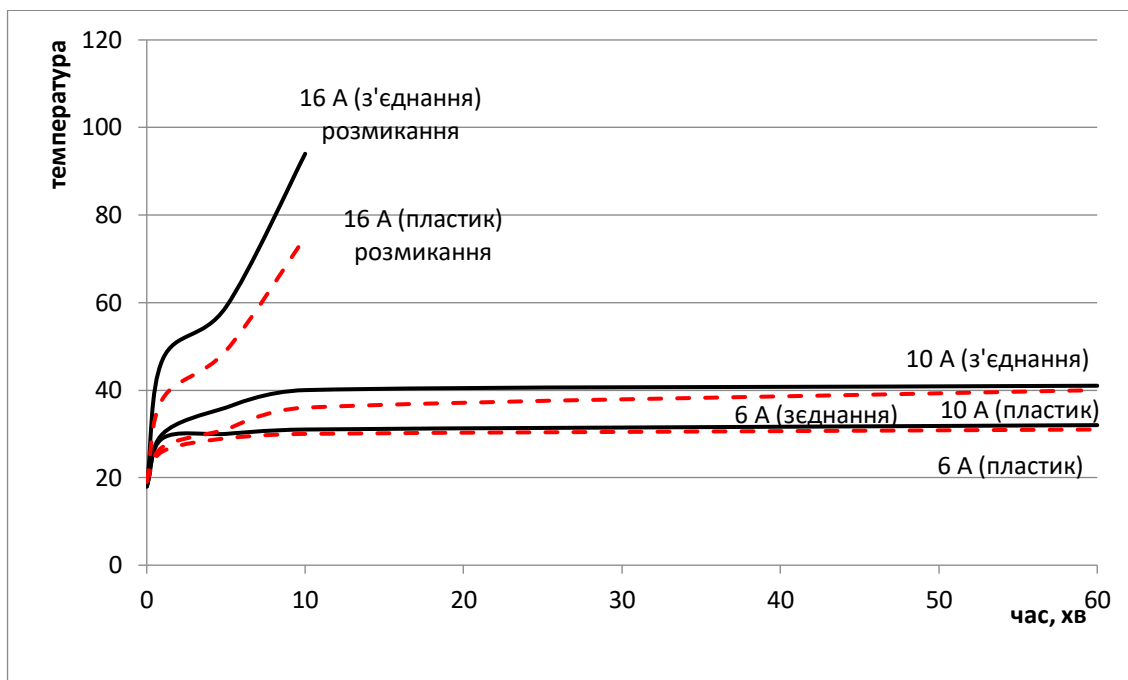
**Рисунок 5.19.** Розподіл температури в контрольному елементі електричного навантаження розетки із захистом та окисленим штепселем.

**5.2.7. Сьома серія експериментів з елементом електричного навантаження розетки із захистом та розігнутим контактом і задовільним штепселем.**

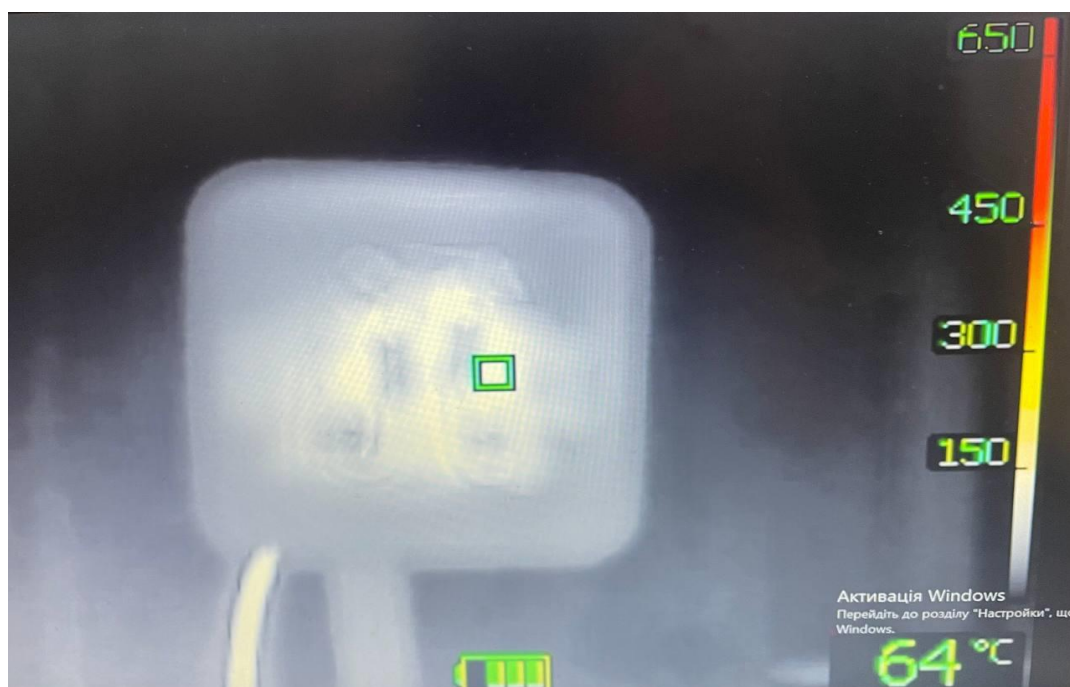
Результати сьомої серії експериментів наведено в таблиці 5.7. та на рис. 5.20., 5.21.

Таблиця 5.7. Результати сьомої серії експериментів

Сила струму, А	Час, хв	Напруга, В	Температура нагрівання, °С	
			місця з'єднання	пластик
6	0	0	18	19
	1	0,17	29	26
	5	0,18	30	29
	10	0,18	31	30
	60	0,18	32	31
10	0	0	18	19
	1	0,35	30	27
	5	0,37	36	31
	10	0,37	40	36
	60	0,39	41	40
16	0	0	18	19
	1	0,74	47	38
	5	0,77	59	49
	10	0,78	94	75
	10	0	94(розмикання)	75(розмикання)



**Рисунок 5.20.** Динаміка температурних значень у контрольному елементі електричного навантаження розетки із захистом та розігнутим контактом і задовільним штепселем.



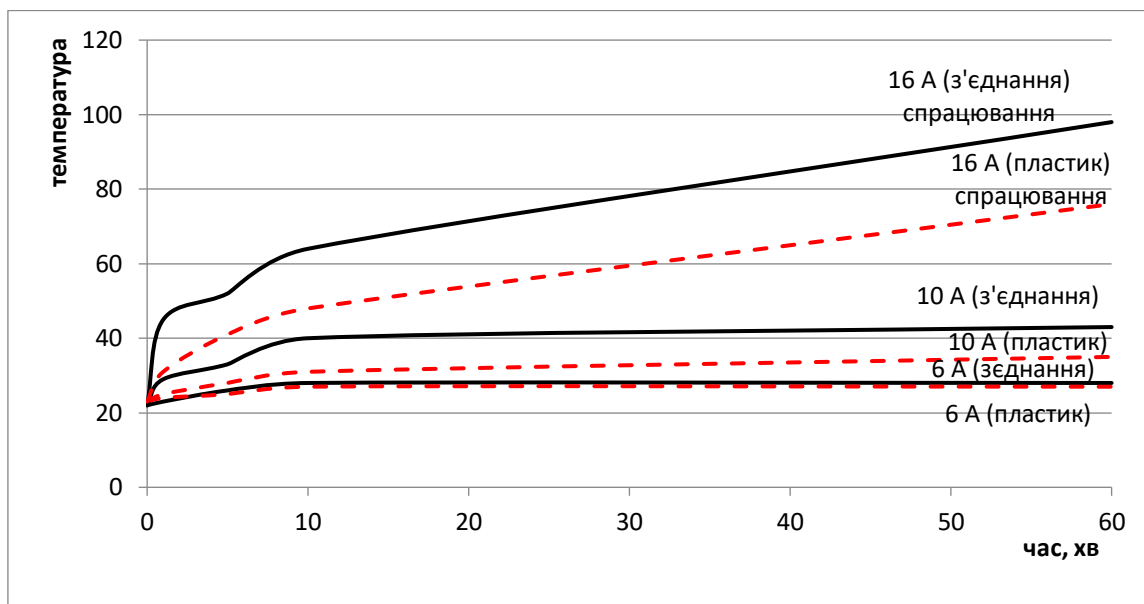
**Рисунок 5.21.** Розподіл температури в контрольному елементі електричного навантаження розетки із захистом та розігнутим контактом і задовільним штепселем.

**5.2.8. Восьма серія експериментів з елементом електричного навантаження розетки з тепловим захистом та розігнутим контактом і окисленим штепселем.**

Результати восьмої серії експериментів наведено в таблиці 5.8. та на рис. 5.22., 5.23.

Таблиця 5.8. Результати восьмої серії експериментів

Сила струму, А	Час, хв	Напруга, В	Температура нагрівання, °С	
			місця з'єднання	пластик
6	0	0	22	23
	1	0,22	23	24
	5	0,23	26	25
	10	0,23	28	27
	60	0,23	28	27
10	0	0	22	23
	1	0,42	29	25
	5	0,43	33	28
	10	0,43	40	31
	60	0,44	43	35
16	0	0	22	23
	1	0,72	45	31
	5	0,75	52	41
	10	0,77	64	48
	60	0,78	98(розмикання)	76(розмикання)



**Рисунок 5.22.** Динаміка температурних значень у контрольному елементі електричного навантаження розетки з тепловим захистом та розігнутих контактом і окисленим штепселем.



**Рисунок 5.23.** Розподіл температури в контрольному елементі електричного навантаження розетки з тепловим захистом та розігнутих контактом і окисленим штепселем.

Таким чином, результати всіх натурних експериментів, виконаних із використанням лабораторної установки, і теоретично розраховані значення очікуваної температури нагрівання місця з'єднання та пластику як частина численних експериментів розташовуються в межах довірчих інтервалів, розрахованих відповідно до критерію Стюдента з надійністю 0,95, що свідчить про хорошу збіжність результатів експериментів і теоретичних розрахунків. Це у свою чергу підтверджує достовірність математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей.

### **5.3. Варіанти впровадження розроблених моделей протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей**

Перш ніж говорити про варіанти впровадження розроблених моделей системи протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей необхідно акцентувати увагу на наступному.

Сучасне електрообладнання продовжує зростати за складністю й важливістю на промислових об'єктах, у комерційних установах і житлових спорудах. Це обладнання часто вважається критичним для нормальної роботи системи. Відтак істотним є захист контурів електричних мереж і загальний протипожежний захист усього електричного обладнання.

Визначення того, чи ланцюг електричної мережі належним чином захищено, може вимагати перегляду електричного розподілу системи високого рівня: від струму несправності, наявного у джерелі живлення, до кінцевого пристрою, підключеного до системи.

Захист ланцюга включає захист від перевантажень обладнання, перенапруги, замикання на землю та короткого замикання. Хоча це передбачено кодексом для будь-якої електричної установки, належна реалізація елементів захисту ланцюгів електричних мереж часом може викликати розбіжності. Іноді ця плутанина призводить до того, що засоби захисту ланцюгів електричних мереж установлюють там, де їх використання не є доцільним.

З огляду на проектування машин, системні інженери та конструктори обладнання повинні обрати відповідні захисні пристрої для підтримування пожежної безпеки та протипожежної надійності своєї продукції. Пристрої



захисту ланцюга захищають дорогі системи шляхом швидкого вимикання живлення компонентів у разі ненормального робочого стану.

Незважаючи на те, що на сьогодні існують різні елементи протипожежного захисту, досить важко зробити правильний вибір на користь тих чи інших пристроїв захисту ланцюга електричних мереж зі складним завданням.

Також упровадження розроблених моделей може мати важливе значення під час встановлення електричних апаратів для попередження прояву супутніх небезпечних чинників.

Найкращим рішенням є встановлення розеток на негорючу основу, відповідно до встановлених норм та стандартів безпеки. Установлення електричних апаратів на горючу основу вимагає використання додаткових безпечних ізоляційних матеріалів, водночас застосування температурних запобіжників дозволило б не допустити нагрівання електричних апаратів до температур самозаймання їх елементів та поверхонь. Як наслідок можна пом'якшити вимоги щодо застосування негорючих підкладок або взагалі їх не встановлювати.

Якщо апарати встановлюються в місцях, де можуть накопичуватися горючі гази або інші легкозаймісті речовини, їх перегрівання може призвести до загоряння та вибуху. Тож використання запропонованих моделей у таких місцях дозволило б підвищити надійність електрообладнання й не допустити виникнення й поширення пожеж.

У разі встановленні апаратів на горючі основи може виникнути ризик виходу токсичних речовин, які виділяються з матеріалів самих електричних приладів та матеріалів конструкцій, на які вони встановлюються. Припинення роботи такого обладнання за досягнення певної граничної температури дозволить попередити отруєння людей летким токсичними речовинами.

Таким чином, найбільш ефективним упровадженням розроблених моделей протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей є сучасна електрична розетка з температурними запобіжниками, які спрацюватимуть у разі перевищення допустимої температури з'єднання й припинять подальше нагрівання шляхом розмикання електричного кола. Остання може використовуватися в усіх наявних вітчизняних системах протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей.

### **Висновки до п'ятого розділу**

1. Джерело живлення BVP TFT 30V 50A, джерело електричного навантаження захисного елемента і розроблена методика проведення емпіричних досліджень з її використанням дозволяють за допомогою низки експериментів перевірити центральну гіпотезу, покладену в основу розроблених структурно-логічної, фізичної та математичної моделей.

2. Результати всіх натурних експериментів, виконаних із використанням лабораторної установки, і теоретично розраховані значення очікуваної температури нагрівання місць з'єднання та пластику як частина численних експериментів розташовуються в межах довірчих інтервалів, розрахованих відповідно до критерію Стюдента з надійністю 0,95, що свідчить про хорошу збіжність результатів експериментів і теоретичних розрахунків. Це у свою чергу підтверджує достовірність математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей.

3. Найбільш ефективним упровадженням розроблених моделей протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей є сучасна електрична розетка з температурними

запобіжниками, які спрацьовуватимуть під час перевищення допустимої температури з'єднання й припинять подальше нагрівання шляхом розмикання електричного кола. Остання може використовуватися в усіх наявних вітчизняних системах протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей.

## ВИСНОВКИ

У роботі вирішено важливе науково-технічне завдання у сфері пожежної безпеки. Запропоновано шляхи підвищення ефективності протипожежного захисту електричних мереж в умовах надмірного локального нагріву в місцях комутації надмірних споживчих потужностей, що забезпечує мінімізацію наслідків загоряння та унеможливорює подальший розвиток пожежі.

1. Аналіз шляхів підвищення протипожежного захисту споруд та електричних мереж показує стійку тенденцію до збереження кількості пожеж від джерел запалення електричного походження. Незважаючи на розвиток сучасних апаратів захисту, електричні розетки залишаються одним із місць, де внаслідок виникнення великого перехідного опору можуть відбуватися значні тепловиділення. Для попередження небезпечного тепловиділення запропоновано обладнати електричний елемент системи протипожежної безпеки електромереж температурними запобіжниками, які спрацюватимуть під час перевищення допустимої температури з'єднання й припинятимуть подальше нагрівання шляхом розмикання електричного кола.

2. Розроблено структурно-логічну модель елемента системи протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей, що складається з двох контурів управління процесом протипожежного захисту: контуру управління в умовах достатності наявного протипожежного захисту (достатнього) та контуру управління процесом протипожежного захисту в умовах комутації надмірних споживчих потужностей (інноваційного), який функціонує в разі встановлення факту наявності обмежень достатності протипожежного захисту. Він складається з восьми блоків, а саме: розроблення нових нормативно-правових актів; розроблення інноваційних технічних засобів захисту; розв'язування окремої

задачі щодо визначення перехідних процесів за короткого замикання; розв'язування окремої задачі величини струмів короткого замикання; розв'язування окремої задачі визначення температури та часу спрацювання плавкого запобіжника; формування математичної моделі попередження пожежі; розроблення методики попередження пожежі за рахунок інноваційного технічного засобу захисту; вироблення управлінських рішень щодо заходів безпеки об'єкту захисту.

3. Розроблено математичну модель протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей, яка являє собою систему з двох аналітичних залежностей. Перша описує залежність основних параметрів елементу системи протипожежного захисту від основних параметрів електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей. Друга дозволяє визначити ефективні параметри елементу системи протипожежного захисту залежно від варіантів розв'язування окремих задач: з визначення перехідних процесів за короткого замикання; з визначення розрахунку струмів короткого замикання; з визначення температури та часу спрацювання плавкого запобіжника.

4. Розроблено фізичну модель елементу протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей, що спирається на процес розмикання електричного кола за умови перегрівання з'єднання в місцях надмірних споживчих потужностей за умови постійної візуалізації світлової індикації працездатності чи спрацювання теплового запобіжника елементу протипожежного захисту.

5. Результати всіх натурних експериментів елементу протипожежного захисту електричних мереж у місцях надмірних споживчих потужностей, який побудовано за принципом, розглянутим у фізичній моделі, і теоретично розраховані значення опору та сили струму в місцях надмірної комутації, як частина численних експериментів, розташовуються в межах довірчих інтервалів, розрахованих відповідно до критерію Стьюдента з надійністю

0,95. Це свідчить про хорошу збіжність результатів емпіричних досліджень і теоретичних розрахунків та уможлиблює коректні висновки в процесі наукової розвідки, підтверджуючи достовірність математичної моделі протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей.

Також найбільш ефективним запровадженням розроблених моделей протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей є сучасна електрична розетка з температурними запобіжниками, які спрацюватимуть у разі перевищення допустимої температури з'єднання й припинять подальше нагрівання шляхом розмикання електричного кола. Остання може використовуватися в усіх наявних вітчизняних системах протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації надмірних споживчих потужностей.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Khan Muhammad, J Ahmad, Mehmood, Seungmin, Sung Wook Baik, "Convolutional neural networks based fire detection in surveillance videos," IEEE Access, vol.6, no., pp. 18174 – 18183, 2018.
2. Khan Muhammad ,J Ahmad, and S.W. Baik, "Early Fire Detection using Convolutional Neural Networks during Surveillance for Effective Disaster Management," Neurocomputing, 2017/12/29/ 2017.
3. H. J. G. Haynes, "Fire Loss in the United States During 2015 <http://www.nfpa.org/>, 2016.
4. T.-H. Chen, P.-H. Wu, and Y.-C. Chiou, "An early fire-detection method based on image processing," in Image Processing, 2004. ICIP'04. 2004 International Conference on, 2004, pp. 1707-1710.
5. C.-B. Liu and N. Ahuja, "Vision based fire detection," in Pattern Recognition," 2004. ICPR 2004. Proceedings of the 17th International Conference on, 2004, pp. 134-137.
6. B. U. Töreyn, Y. Dedeoğlu, U. Güdükbay, and A. E. Cetin, "Computer vision based method for real-time fire and flame detection," Pattern recognition letters, vol. 27, pp. 49-58, 2006.
7. J. Choi and J. Y. Choi, "Patch-based fire detection with online outlier learning," in Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS), 2015 12th IEEE International Conference on, 2015, pp. 1-6.
8. G. Marbach, M. Loepfe, and T. Brupbacher, "An image processing technique for fire detection in video images," Fire safety journal, vol. 41, pp. 285-289, 2006.
9. T. Celik and H. Demirel, "Fire detection in video sequences using a generic color model," Fire Safety Journal, vol. 44, pp. 147-158, 2009.
10. P. V. K. Borges and E. Izquierdo, "A probabilistic approach for vision-based fire detection in videos," IEEE transactions on circuits and systems for video technology, vol. 20, pp. 721-731, 2010.

11. A. Rafiee, R. Dianat, M. Jamshidi, R. Tavakoli, and S. Abbaspour, "Fire and smoke detection using wavelet analysis and disorder characteristics," in *Computer Research and Development (ICCRD)*, 2011 3rd International Conference on, 2011, pp. 262-265.

12. S. Bayoumi, E. AlSobky, M. Almohsin, M. Altwaim, M. Alkaldi and M. Alkahtani, "A Real-Time Fire Detection and Notification System Based on Computer Vision," 2013 International Conference on IT Convergence and Security (ICITCS), Macao, pp. 1-4, 2013. doi:10.1109/ICITCS.2013.6717783.

13. M. S. Bin Bahrudin, R. A. Kassim and N. Buniyamin, "Development of Fire alarm system using Raspberry Pi and Arduino Uno," 2013 International Conference on Electrical, Electronics and System Engineering (ICEESE), Kuala Lumpur, pp. 43-48, 2013. doi: 10.1109/ICEESE.2013.6895040.

14. J. Yang, B. Jiang, B. Li, K. Tian, and Z. Lv, "A fast image retrieval method designed for network big data," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017.

15. S. Verstockt, T. Beji, P. De Potter, S. Van Hoecke, B. Sette, B. Merci, et al., "Video driven fire spread forecasting (f) using multi-modal LWIR and visual flame and smoke data," *Pattern Recognition Letters*, vol. 34, pp. 62-69, 2013.

16. D. Starikov, C. Boney, R. Pillai and A. Bensaoula, "Dual-band UV/IR optical sensors for fire and flame detection and target recognition," *IEEE Sensors for Industry Conference*, 2004. Proceedings, pp. 36-40, 2014. doi: 10.1109/SFICON.2004.1287124.

17. S. J. Pan and Q. Yang, "A survey on transfer learning," *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, vol. 22, no. 10, pp. 1345–1359, Oct. 2010.

18. K. Muhammad, R. Hamza, J. Ahmad, J. Lloret, H. H. G. Wang, and S. W. Baik, "Secure Surveillance Framework for IoT systems using Probabilistic



Image Encryption,” IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. PP, pp. 1-1, 2018.

19. Noorinder, Jaspreet Singh, Ekambir Sindhu, “Raspberry Pi based Smart Fire Management System employing Sensor based Automatic Water Sprinkler,” 2017 International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC) .

20. K. Muhammad, J. Ahmad, and S. W. Baik, “Early Fire Detection using Convolutional Neural Networks during Surveillance for Effective Disaster Management,” Neurocomputing, 2017/12/29/ 2017

21. X. Wu, C. Ngo, and Q. Li, “Threading and autodocumenting news videos: a promising solution to rapidly browse news topics,” IEEE Signal Processing Magazine, vol. 3, no. 2, pp. 59–68, March 2006.

22. Y. Wang, Z. Liu, and J. C. Huang, “Multimedia content analysis-using both audio and visual clues,” IEEE Signal Processing Magazine, vol. 17, no. 6, pp. 12–36, November 2000.

23. MESH, ,” Multimedia Semantic Syndication for Enhanced News Service - European Commission Project - IST 6th Framework Programme. pp. 49–58.

24. KSPACE, ,” - Knowledge Space of Semantic Inference for Automatic Annotation and Retrieval of Multimedia Content - European Commission Project - IST 6th Framework Programme. pp. 51–62.

25. C. L. Lai, J. C. Yang, and Y. H. Chen, “A real time video processing based surveillance system for early fire and flood detection,” in IEEE proceedings of Instrumentation and Measurement Technology Conference, Warsaw, Poland, May 2007. pp. 59–68.

26. P. Huang, J. Su, Z. Lu, and J. Pan, “A fire-alarming method based on video processing,” in IEEE International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing, December 2006, pp. 359–364.

27. T. Celik, H. Demirel, H. Ozkaramanli, and M. Uyguroglu, “Fire detection in video sequences using statistical color model,” in IEEE International

Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Toulouse, France, May 2006, vol. 2. pp. 39–44

28. P. V. K. Borges, J. Mayer, and E. Izquierdo, “Efficient visual fire detection applied for video retrieval,” in 16th European Signal Processing Conference, August 2008. pp. 159–168

29. B. U. Toreyin and A. E. Cetin, “Online detection of fire in video,” in IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 2007. pp. 59–68

30. C. Liu and N. Ahuja, “Vision based fire detection,” in International Conference on Pattern Recognition, August 2004, vol. 4, pp. 134–137.

31. T. Celik, H. Ozkaramanli, and H. Demirel, “Fire pixel classification using fuzzy logic and statistical color model,” in International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, April 2007, vol. 1, pp. 1205–1208.

32. T. Chen, P. Wu, and Y. Chio, “An early fire-detection method based on image processing,” in IEEE International Conference on Image Processing, October 2004, vol. 3, pp. 1707–1710.

33. S. C. Liew, A. Lim, and L. K. Kwoh, “A stochastic model for active fire detection using the thermal bands of modis data,” IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 2, no. 3, pp. 337–341, July 2005.

34. Y. Li, A. Vodacek, R. L. Kremens, A. Ononye, and C. Tang, “A hybrid contextual approach to wildland fire detection using multispectral imagery,” IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 43, no. 9, pp. 2115 – 2126, September 2005.

35. A. Abuelgasim and R. Fraser, “Day and night-time active fire detection over north america using noaa-16 avhrr data,” in IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, June 2002, vol. 3, pp. 1489–1491.

36. G. Healey, D. Slater, T. Lin, B. Drda, and A. D. Goedeke, “A system for real-time fire detection,” in IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 1993. pp. 1259–1268

37. III W. Phillips, M. Shah, and N. da Vitoria Lobo, "Flame recognition in video," in IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, December 2000, pp. 224–229.
38. T. Celik and H. Demirel, "Fire detection in video sequences using a generic color model," *Fire Safety Journal*, vol. 44, no. 2, pp. 147–158, February 2009.
39. B. U. Toreyin, Y. Dedeoglu, U. Gudukbay, and E. Cetin, "Computer vision based method for real-time fire and flame detection," *Pattern Recognition Letters*, vol. 27, no. 4, pp. 49–58, 2006.
40. C. Ho, "Machine vision-based real-time early flame and smoke detection," *Meas. Sci. Technol.*, , no. 20, 2009. pp. 359–368
41. Z. Xiong, R. E. Caballero, H. Wang, A. M. Finn, and P. Peng, *Multimedia Content Analysis*, chapter Video Fire Detection – Techniques and Applications in the Fire Industry, pp. 339–351, Springer, 2009.
42. B. C. Ko, K. Cheong, and J. Nam, "Fire detection based on vision sensor and support vector machines," *Fire Safety Journal*, vol. 44, no. 3, pp. 322–329, April 2009.
43. C. E. Baukal Jr., *The John Zink Combustion Handbook*, CRC, 1st edition, 2001. pp. 59–68
44. D. G. Manolakis, V. K. Ingle, and S. M. Kogon, *Statistical and Adaptive Signal Processing*, McGraw-Hill, 2000. pp. 234–242
45. B. W. Silverman, *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*, Chapman and Hall, 1st edition, 1986 pp. 159–168
46. S. M. Kay, *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory*, vol. 1, Prentice Hall, 1993. pp. 332-336
47. S. M. Kay, *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Detection Theory*, vol. 2, Prentice Hall, 4 edition, 1998. pp. 867–868
48. S. Theodoridis and K. Koutroumbas, *Pattern Recognition*, Academic Press, 2006. pp. 1707-1710

49. R. C. Gonzalez and R. E. Woods, Digital Image Processing, Addison-Wesley, 1992. pp. 107-110
50. J. Junqua and J. Haton, Robustness in Automatic Speech Recognition: Fundamentals and Applications, Kluwer Academic Publishers, 1995. pp. 2707-2713
51. W. Szpankowski, Average Case Analysis of Algorithms on Sequences, Wiley-Interscience, 1st edition, 2001. pp. 170-174
52. P. Roeper and H. Leblanc, Probability Theory and Probability Logic, University of Toronto Press, 1st edition, 1999. pp. 17-27
53. A. Papoulis and S. U. Pillai, Probability, Random Variables and Stochastic Processes, McGraw-Hill, 4th edition, 2001. pp. 84-97
54. S. M. Kay, Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory, vol. 1, Prentice Hall, 1993. pp. 100-106
55. S. M. Kay, Fundamentals of Statistical Signal Processing: Detection Theory, vol. 2, Prentice Hall, 4 edition, 1998. pp. 345-351
56. S. Theodoridis and K. Koutroumbas, Pattern Recognition, Academic Press, 2006. pp. 140-152
57. R. C. Gonzalez and R. E. Woods, Digital Image Processing, Addison-Wesley, 1992. pp. 1407-1410
58. J. Junqua and J. Haton, Robustness in Automatic Speech Recognition: Fundamentals and Applications, Kluwer Academic Publishers, 1995. pp. 72-81
59. W. Szpankowski, Average Case Analysis of Algorithms on Sequences, Wiley-Interscience, 1st edition, 2001. pp. 94-101
60. P. Roeper and H. Leblanc, Probability Theory and Probability Logic, University of Toronto Press, 1st edition, 1999. pp. 412-417
61. A. Papoulis and S. U. Pillai, Probability, Random Variables and Stochastic Processes, McGraw-Hill, 4th edition, 2001. pp. 707-710
62. Hall, J.R., private communication, National Fire Protection Assn., Quincy MA, 2007. pp. 236-241

63. Hall, J.R. jr., Bukowski, R.W., and Gomberg, A., "Analysis of Electrical Fire Investigations in Ten Cities," National Bureau of Standards Report NBSIR 83-2803, Gaithersburg MD, 1983. pp. 307-315
64. Babrauskas, V., Ignition Handbook, Fire Science Publishers/Society of Fire Protection Engineers, Issaquah WA, 2003. pp. 56-65
65. The Authoritative Dictionary of IEEE Standard Terms (IEEE 100), 7 th ed., IEEE Press, New York, 2000. pp. 181-186
66. Shea, J.J., "Identifying Causes for Certain Types of Electrically Initiated Fires in Residential Circuits," Aged Wiring Conf., Fire Protection Research Foundation, Quincy MA, 2006. pp. 107-110
67. "Method for the Determination of the Proof Tracking and Comparative Tracking Indices of Solid Insulating Materials," International Electrotechnical Commission Standard IEC 60112 , Geneva. 2006. pp. 81-91
68. "Test Method for High-Voltage, Low-Current Dry Arc Resistance of Solid Electrical Insulation," ASTM International Standard ASTM D 495, West Conshohocken PA. 2008. pp. 807-810
69. Goodson, M., Perryman, T., and Colwell, K., (2002) Effects of Polyurethane Foam Systems on Wiring Ampacity, Fire & Arson Investigator 52(4): 47-50.
70. Hagimoto, Y., Watanabe, N., and Okamoto, K., "A Short Circuit as an Ignition Source of Fire," in Interflam 2007, Interscience Communications Ltd, London, 2007, pp. 1555-1560.
71. Smith, L. E., and McCoskrie, D., (1990) What Causes Wiring Fires in Residences, Fire J. 84:19-24, 69 Jan/Feb.
72. Babrauskas, V., (2006) Mechanisms and Modes for Ignition of Low-voltage, PVC-insulated Electrotechnical Products, Fire & Materials 30:150-174, 2006, doi:10.1002/fam.900.
73. "Polymeric Materials—Long Term Property Evaluation," Underwriters Laboratories Inc. Standard UL 746B, Northbrook IL, 2000. pp. 91-102

74. Aged Electrical Systems Research Application Symp., Fire Protection Research Foundation, Quincy MA, 2006. pp. 45-49
75. Dini, D.A., Fabian, T.Z., and Chapin, J.T., "An Analytical Study of Some Physical Properties of Wire and Cable Samples Collected from Older Homes," Aged Electrical Systems Research Application Symp., Fire Protection Research Foundation, Quincy MA, 2006. pp. 78-87
76. Patel, V., "Electrical Wiring Systems and Fire Risk in Residential Dwellings," Ministry of Economic Development report, Wellington, New Zealand, 2005. pp. 173-178
77. Chavez, J.M., "Steady-State Environment Cable Damage Testing," Sandia National Laboratories Quick Look Test Report, Albuquerque NM, 2006. pp. 1707-1710
78. Lukens, L.L., "Nuclear Power Plant Electrical Cable Damageability Experiments," Sandia National Laboratories Report SAND82-0236, Albuquerque NM, 2006. pp. 245-256
79. Jacobus, M.J., and Fuehrer, G.F., "Submergence and High Temperature Steam Testing of Class 1E Electrical Cables," Sandia National Laboratories Report SAND90-2629; NUREG/CR-5655, Albuquerque NM, 1991. pp. 32-47
80. Nowlen, S.P., "An Investigation of the Effects of Thermal Aging on the Fire Damageability of Electric Cables," Sandia National Laboratories Report SAND90-0696; NUREG/CR-5546, Albuquerque NM, 1991. pp. 67-85
81. Babrauskas, V., (2004) Arc Beads from Fires: Can 'Cause' Beads Be Distinguished from 'Victim' Beads by Physical or Chemical Testing? *J. Fire Protection Engineering* 14:125-147, doi:10.1177/1042391504036450.
82. Mazer, W.M., *Electrical Accident Investigation Handbook*, 3 vols., Electrodata, Inc., Glen Echo MD, various dates). 2006. pp. 37-51
83. Nabours, R.E., Fish, R.M., and Hill, P.F., *Electrical Injuries: Engineering, Medical and Legal Aspects*, 2nd ed., Lawyers & Judges Publishing Co., 2004. pp. 64-69

84. EC&M (Electrical Construction & Maintenance) magazine, Penton Media, Chicago (various issues). 2006. pp. 17-21
85. “National Electrical Code” National Fire Protection Assn. NFPA 70, Quincy, MA. 2006. pp. 77-91
86. Babrauskas, V., and Simonson, M., (2007) Fire Behaviour of Plastic Parts in Electrical Appliances—Standards versus Required Fire Safety Objectives, *Fire & Materials* 31:83-96, doi:10.1002/fam.927
87. M. Higginson and D. B. Durocher, “Proper application & maintenance of molded case breakers to assure safe and reliable operation,” *Electrical Safety Workshop*, 2009. IEEE IAS. IEEE, 2009, pp. 1–12.
88. X. Niu, X. Zhao, “The study of fault diagnosis the high-voltage circuit breaker based on neural network and expert system”, *Procedia Engineering*, Vol. 29, 2012, pp. 3286-3291.
89. HUANG Kai, ZHAO Shuqiang, “Evaluation of residual service life of high voltage circuit breaker”, *Electricity Distribution (CICED)*, 2012 China International Conference on, 2013, 13500407.
90. Zhihong Guo, Yi Yang, Hang Liu, Youyuan Wang, Liwei Zhou, “Reliable Life Calculation of Circuit Breaker Based on FTA and Reliability function”, *High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 2016 IEEE International Conference on, 2016, 16558339.
91. Xin Zhang, Ronghui Huang, Senjing Yao, Gaoyang Li, Linlin Zhong, Xiaohua Wang, “Mechanical Life Prognosis of High Voltage Circuit Breakers Based on Support Vector Machine”, *Natural Computation (ICNC)*, 2015 11th International Conference on, 2016, 15700624.
92. Mingzhe Rong, Xiaohua Wang, Wu Yang, “Mechanical Condition Recognition of Medium-Voltage Vacuum Circuit Breaker Based on Mechanism Dynamic Features Simulation and AN”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, Issue: 3, 2005, 8526429.

93. X. Zhang and E. Gockenbach, H. B. Chen, Z. L. Liu, L. H. Yang, K. Gao and C. Z. Fu, “Life Management of 550kV SF6 Circuit Breakers”, 2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE).

94. A.I. Khalyasmaa, S.A. Dmitriev, “Expert system for engineering assets’ management of utility companies,” Proceedings 10th edition of the IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED 2015), P. 421-427, 2015.

95. IEC 60567:2011 “Oil-filled electrical equipment - Sampling of gases and analysis of free and dissolved gases - Guidance.”

96. A.I. Khalyasmaa, S.A. Dmitriev, A.S. Semerikov, “Decision Support System for Circuit-Breaker Technical State Assessment”, Proceedings of the XIX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM 2016), 2016, pp. 120-123.

97. S. A. Eroshenko, A. O. Egorov, M.R. Zagidullin, M.D. Senuk. The indicator system for the short circuit currents levels assessment in the power systems. “2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)”. Technical University of Sofia, Bulgaria. – 2017.

98. Khalyasmaa, A.I., Senyuk, M.D., Eroshenko, S.A. The short circuit currents calculations model for integral forecasting of the switching facilities residual life. 2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA). P. 53-57.

99. Manuelito Y. Del Castillo, Hwachang Song “Tabu search based topology modification for reduction of fault current level in power systems” – Dept. of Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, 139-743, Korea.

100. M. Khorrami, Mohhamad S. Nader, and N. Khalil Nejhad, “Short Circuit Current Level Control and its Effects on Circuit Breakers Transient Studies”, Journal of Electrical Engineering: Theory and Application, vol. 1, 2010, pp. 4-17.



101. Eroshenko SA, Zagidullin MR, Senyuk MD, Kuznetsov K.A. Infographics of the levels of short-circuit currents for improving the quality of solutions for the operational management and development of the region's energy system // Collected papers of the VII International Youth Scientific and Technical Conference "Electric Power Through the Eyes of Youth - 2016"

102. I.P. Kryuchkov, V.A. Starshinov, Yu.P. Gusev et al. Short circuits and the choice of electrical equipment: a textbook for universities. M.: Publishing house MEI, 2012.

103. Пожежна безпека вдома URL: <https://mercor.com.ua/pozhezhna-bezpeka-vdoma-yak-zahystyty-svoyu-rodynu-ta-majno/>

104. Різновиди розеток URL: <https://pobachyty.blogspot.com/2019/05/riznovydy-rozetok.html>

105. Pin-free Mi Plug project reimagines power outlets for the 21st century URL: <https://www.dezeen.com/2018/10/07/pin-free-mi-plug-wireless-technology-design/>

106. У ТОП-50 стартапів світу: безконтактну розетку розробили в Чернігові URL: <https://cheline.com.ua/chelinetv/suspilstvo-video/u-top-50-startapiv-svitu-bezkontaktnu-rozetku-rozrobili-v-chernigovi-video-129762>

107. Розумна Wi-Fi розетка TP-Link HS110 // режим доступу: <http://www.era.kh.ua/power/filters/tp-link-hs110--115168.html>

108. Broadlink SP Contros розумна Wi-Fi розетка URL: <http://www.mybuy24.net/catalog/umnyy-dom/broadlink-sp-contros-umnaya-wi-fi-rozetka/>

109. AUBESS 16A EU WiFi Smart Plug With Power Monitor Tuya Smart Life WiFi Wireless Socket Outlet Works With Alexa Google Home Alice URL: <https://ledukraine.com/rozumna-bezdrotova-rozetka-aubess-16a-eu-wifi/>

110. Fibaro Wall Plug FGWPE-101 керована розетка URL: <http://www.mybuy24.net/catalog/umnyy-dom/fibaro-wall-plug-fgwpe-101-upravlyaemaya-rozetka>

111. GSM розетка з дистанційним керуванням і датчиком температури «Домовий» URL: <http://ohrana.ua/ppk/gsm-rozetka-domovoj.html>
112. Weinberger, Pedro J. "Safety electrical outlet with logic control circuit." U.S. Patent No US6552888B2. 22 Apr. 2003.
113. Cruz Pereira Serge Da, Aurelien Maudemain, Michel Faure Method for overheat protection of electrical connection socket for connecting e.g. electric vehicle, to electricity distribution network, involves cutting passage of electricity into socket according to overheating state of socket France Patent No. FR2968475A1 .06 Dec/ 2010.
114. AUPO temperature fuse BF series URL: [http://www.tpqe.com/pdfs/201712/08\\_75920.pdf](http://www.tpqe.com/pdfs/201712/08_75920.pdf)
115. Землянський О.М., Мирошник О.М., Зобенко О.О., Лесечко Д.В. Розроблення розеточного модуля електричної мережі. Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація» Том 4 №2. С.20-28.
116. Зобенко О.О. Математична модель протипожежного захисту електричних мереж у місцях комутації під час надмірного локального нагрівання. Науково-технічний збірник "Комунальне господарство міст" 4(171), 101–106
117. Зобенко О.О. Сучасний стан з підвищення ефективності протипожежного захисту електричних мереж в місцях комутації надмірних споживчих потужностей. Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація» Том 6 №1. С.20-28.
118. Зобенко О.О. Модель протипожежного захисту електричних мереж у місцях контактних з'єднань. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека No 1 (15), 141-148 с.

119. Borisenko, I., Burmenko, O., Deyneko, N., Zobenko, O., Yivzhenko, Y., Kamyshentsev, G., Muraviov, V., Mykhailovska, Y., Khrystych, V., Kryvonis, S. Development of a method for producing effective solar elements CdS/CdTe/Cu/Au on a flexible substrate designed for backup supplying systems prevention of emergency situations. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (5 (114)), 6–11

120. Zobenko, O.; Loboichenko, V.; Lutsenko, Y.; Pidhornyy, M.; Zemlianskyi, O.; Hrushovinchuk, O.; Blyashenko, O.; Servatyuk, V. Study of the Features of the Protection of Energy System Elements Caused by Excessive Local Heating. Water and Energy International Volume 65r, Issue 10, Pages 34 – 40, 2023

121. О. Землянський, К. Мигаленко, П. Заїка, В. Томенко, С. Тарасов, О. Зобенко, М. Томенко. «Спеціальна електротехніка». Навчальний посібник ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля, 540с., 2022.

**ДОДАТОК.****Акти впровадження результатів дисертаційної роботи**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
 Директор Черкаської філії  
 «Новосвіт»  
 Микрюков І.П.



05 2024 р.

### АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи  
 Зобенка Олександра Олександровича на тему:  
 «Підвищення ефективності протипожежного захисту електричних мереж в  
 місцях комутації надмірних споживчих потужностей»

Цей акт складено про те, що результати досліджень, представлених у дисертаційній роботі Зобенка Олександра Олександровича, було застосовано у роботі Лоташівської гідроелектростанції Черкаської філії ЗЕА «Новосвіт».

Результати проведених досліджень мають практичну цінність у розрізі розробленої фізичної та математичної моделей елементу протипожежного захисту електричних мереж в місцях надмірних споживчих потужностей яка спирається на процес розмикання електричного кола за умови перегрівання з'єднання в місцях великих перехідних опорів та спрацювання теплового запобіжника елементу протипожежного захисту.

Отримані в роботі результати дозволяють підвищити захист контурів електричних мереж та забезпечити протипожежний захист електричного обладнання, не допустивши нагрівання електричних апаратів до температури самозаймання їх елементів та поверхонь, запобігти активному виділенню токсичних речовин.

На ЧФ ЗЕА «Новосвіт» застосування теплового запобіжника в окремих ділянках комутаційного обладнання, релейного захисту та автоматики забезпечує захист дороговартісного обладнання від часткового або повного виходу з ладу.

Розглянувши результати дисертаційного дослідження, можна вважати цей напрямок перспективним в подальшому застосуванні на інших енергетичних об'єктах підприємства.

Заступник директора  
 ЧФ ЗЕА «Новосвіт»

«08» 05 2024 р.



Анатолій Петрунь



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор  
ТОВ «Спецзахист-АСПС»  
Вишневська А.А.

«02» 05 2024 р.

### АКТ

#### впровадження результатів дисертаційної роботи Зобенка Олександра Олександровича за темою:

«Підвищення ефективності протипожежного захисту електричних мереж в місцях комутації надмірних споживчих потужностей»

Даний акт складено про те, що результати дисертаційної роботи Зобенка Олександра Олександровича було застосовано у роботі компанії ТОВ «Спецзахист-АСПС».

За допомогою результатів дослідження, вдалося підвищити ефективність протипожежного захисту контурів електричних мереж, запобігти активному виділенню токсичних речовин, забезпечити протипожежний захист електричного обладнання, не допустивши нагрівання електричних апаратів до температури самозаймання їх елементів. Результати усіх проведених досліджень мають практичну цінність у розрізі сформульованої фізичної та математичної моделей елемента протипожежного захисту електричних мереж в місцях надмірних споживчих потужностей, котра спирається на процес розмикання електричного кола за умови перегрівання з'єднання в місцях великих перехідних опорів та спрацювання елемента протипожежного захисту.

Застосування елемента протипожежного захисту використовується в компанії ТОВ «Спецзахист-АСПС» в місцях комутації з підвищеною пожежною небезпекою.

Використання розроблених моделей дозволяє підвищити ефективність протипожежного захисту електричних мереж в місцях надмірних потужностей, виходячи з цього, можна вважати даний напрямок перспективним для подальшого застосування.

Заступник директора

А.В. Гвоздь

«02» 05 2024 р.



**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Т. в. о. Начальника Черкаського інституту  
пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля  
Національного університету цивільного  
захисту України  
генерал-майор служби цивільного захисту



Ігор РОМАНЮК

20 24 року

**АКТ**

про впровадження в навчальний процес  
Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля  
Національного університету цивільного захисту України  
результатів дисертації

Зобенка Олександра Олександровича

«Підвищення ефективності протипожежного захисту електричних мереж в  
місцях комутації надмірних споживчих потужностей»  
представленої на здобуття ступеня доктора філософії  
за спеціальністю 261 «Пожежна безпека»

Комісія у складі: начальника навчально-методичного відділу к. т. н.,  
доцента Джулая Олександра Миколайовича, начальника факультету пожежної  
безпеки к. т. н., доцента Мельника Валентина Павловича, заступника  
начальника факультету – начальника кафедри автоматичних систем безпеки та  
електроустановок к. т. н., доцента Мигаленка Костянтина Івановича та к. т. н.,  
доцента кафедри автоматичних систем безпеки та електроустановок Заїки  
Петра Івановича склали акт про те, що результати дисертаційної роботи  
Зобенка Олександра Олександровича за темою: «Підвищення ефективності  
протипожежного захисту електричних мереж в місцях комутації надмірних  
споживчих потужностей» мають теоретичне та практичне значення для  
освітнього процесу.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливого наукового  
завдання у сфері пожежної безпеки, а саме запропоновано шляхи підвищення  
ефективності протипожежного захисту електричних мереж в умовах високого  
локального нагріву місць комутації надмірних споживчих потужностей, що  
забезпечує мінімізацію наслідків загоряння та унеможливує подальший  
розвиток пожежі.

З метою підвищення ефективності підготовки фахівців для ДСНС України результати дисертаційної роботи впроваджено в освітній процес при підготовці фахівців освітнього рівня «бакалавр» та «магістр» на кафедрі автоматичних систем безпеки та електроустановок за спеціальністю 261 «Пожежна безпека» під час вивчення дисципліни «Пожежна безпека електроустановок». При підготовці фахівців освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 263 «Цивільна безпека» під час вивчення дисципліни «Електротехніка та безпека електроустановок». Та при підготовці фахівців освітнього рівня «магістр» за спеціальністю 261 «Пожежна безпека» під час вивчення дисципліни «Автоматичні системи забезпечення протипожежного захисту».

Впровадження результатів дасть можливість забезпечити актуальний характер освіти та високий науково-методичний рівень викладання даних дисциплін і дозволить підвищити якість проведення лекційних та практичних занять для здобувачів вищої освіти.

Начальник  
навчально-методичного відділу  
кандидат технічних наук, доцент



Олександр ДЖУЛАЙ

Начальник  
факультету  
пожежної безпеки  
кандидат технічних наук, доцент



Валентин МЕЛЬНИК

Заступник начальника  
факультету – начальник кафедри  
автоматичних систем безпеки  
та електроустановок  
кандидат технічних наук, доцент



Костянтин МИГАЛЕНКО

Доцент кафедри автоматичних  
систем безпеки та електроустановок  
кандидат технічних наук, доцент



Петро ЗАЙКА



**ЗАТВЕРДЖУЮ**Перший заступник начальника  
Інституту державного управління та  
наукових досліджень  
з цивільного захистуВалерій БОРИС  
2024 року**АКТ****впровадження результатів дисертаційної роботи  
ЗОБЕНКА Олександра Олександровича на тему:****«Підвищення ефективності протипожежного захисту електричних мереж в  
місцях комутації надмірних споживчих потужностей»**

Комісія у складі: голови комісії – начальника науково-дослідного центру протипожежного захисту ІДУ НД ЦЗ доктора техн. наук, професора НІЖНИКА Вадима Васильовича, членів комісії: заступник начальника центру – начальника відділу нормативно-технічного забезпечення ІДУ НД ЦЗ канд. техн. наук, старшого дослідника ФЕЩУКА Юрія Леонідовича та заступника начальника відділу нормативно-технічного забезпечення ІДУ НД ЦЗ канд. техн. наук, старшого дослідника БАЛЛО Ярослава В'ячеславовича склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи ЗОБЕНКА Олександра Олександровича на тему: «Підвищення ефективності протипожежного захисту електричних мереж в місцях комутації надмірних споживчих потужностей» впроваджено у наукову діяльність науково-дослідного центру протипожежного захисту Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, шляхом застосування результатів проведених досліджень, які мають практичну цінність у розрізі розроблених удосконалень присвячених вирішенню важливого наукового завдання у сфері пожежної безпеки та запропоновано шляхи підвищення ефективності протипожежного захисту електричних мереж в умовах надмірного локального нагріву в місцях комутації надмірних споживчих потужностей, що забезпечує мінімізацію наслідків загоряння та унеможливорює подальший розвиток пожежі. В дисертаційному дослідженні був проведений аналіз сучасного стану з підвищення ефективності

протипожежного захисту електричних мереж в місцях комутації надмірних споживчих потужностей та розроблена структурно-логічну модель елементу системи протипожежного захисту електричних мереж в місцях комутації надмірних споживчих потужностей. Розроблена математична модель протипожежного захисту електричних мереж в місцях комутації надмірних споживчих потужностей. Побудована фізична модель елементу протипожежного захисту електричних мереж в місцях надмірних споживчих потужностей та відбулась перевірка достовірності розроблених моделей.

Акт складено для надання в разову спеціалізовану вчену раду у зв'язку із захистом дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Голова комісії  
доктор техн. наук, професор



Вадим НІЖНИК

Члени комісії  
канд. техн. наук, старший дослідник



Юрій ФЕЩУК

канд. техн. наук, старший дослідник



Ярослав БАЛЛО

ЗАТВЕРДЖУЮ  
 Начальник Головного управління  
 ДСНС України у Черкаській області  
 полковник служби цивільного захисту  
 Олександр ЄВПАК

«05» 03 2024 року



### АКТ

#### впровадження результатів дисертаційної роботи

#### Зобенка Олександра Олександровича за темою :

«Підвищення ефективності протипожежного захисту електричних мереж в місцях комутації надмірних споживчих потужностей»

Комісія у складі: начальника дослідно-випробувальної лабораторії аварійно-рятувального загону спеціального призначення ГУ ДСНС України у Черкаській області Сук Сергія – голова комісії та членів комісії: заступника начальника кафедри автоматичних систем безпеки та електроустановок доктора технічних наук, доцента Землянського Олега, кандидата технічних наук, доцента Заїки Петра. Даний акт складено на основі того, що результати досліджень, які представлено в дисертаційній роботі Зобенка Олександра Олександровича мають практичну цінність в діяльності «Дослідно-випробувальної лабораторії Аварійно-рятувального загону спеціального призначення Головного управління ДСНС України у Черкаській області», а саме застосування математичної моделі елементу протипожежного захисту електричних мереж під час складання висновків про причини виникнення пожеж пов'язаних з пожежами в місцях комутації електрообладнання.

Переглянувши результати дисертаційного дослідження, можна вважати цей напрямок перспективним в подальшому використанні.

Голова комісії :

Сергій СУК

Члени комісії:

Олег ЗЕМЛЯНСЬКИЙ

Петро ЗАЙКА