



УДК 621.331

О. І. Лобода, к.т.н.

ORCID: 0000-0003-1532-336

Д. М. Нестерчук, к.т.н.

ORCID: 0000-0003-1995-9564

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

e-mail: oleksandr.loboda@tsatu.edu.ua

## **МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ КОНТРОЛЮ СИЛОВИХ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ ДЛЯ НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ ОЦІНКИ СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ**

*Анотація.* Розглянута можливість вдосконалення методології діагностування та моніторингу стану ізоляції силових кабельних ліній шляхом моделювання структури автоматизованого комплексу контролю для нечіткої системи оцінки стану ізоляції.

Обґрунтована структура автоматизованого комплексу, який містить блок первинних перетворювачів струму, блок контролю напруги та мікропроцесорний пристрій контролю ізоляції, при цьому об'єктом контролю є силова кабельна лінія.

Наведені структурна схема автоматизованого комплексу контролю стану ізоляції кабельних ліній та блок-схема операцій формування рішення блоком нечіткого логічного контролю. Зазначено, що використання апарату нечіткої логіки дозволяє більш повно врахувати всі механізми, що діють на ізоляцію навантажень, й всі зовнішні умови.

Для апаратної реалізації автоматизованого комплексу пропонується до застосування база на основі платформи Arduino. Наведена блок-схема алгоритму функціонування комплексу контролю стану ізоляції кабельних ліній та обґрунтовані місця підключення структурних блоків автоматизованого комплексу при контролі стану ізоляції кабельної лінії.

Встановлено, що впровадження запропонованої моделі автоматизованого комплексу контролю дозволить зменшити кількість та частоту аварійних ситуацій, подовжити термін служби силових кабельних ліній та підвищити їх експлуатаційну надійність.

*Ключові слова:* стан ізоляції, силова кабельна лінія, діагностування та моніторинг, автоматизований комплекс, структурна схема, блок нечіткого логічного контролю на базі мікроконтролеру, алгоритм функціонування, експлуатаційна надійність.



*Постановка проблеми.* В наш час в електричних мережах промислових підприємств значна частина силового електрообладнання, а саме, кабельні лінії та силові трансформатори, значно вичерпали свій нормативний термін служби, при цьому таке електрообладнання характеризується підвищеними втратами потужності у режимі неробочого ходу.

Аналіз існуючих методів діагностування силових кабельних ліній показує, що на даний час контроль технічного стану, в більшості випадків, відбувається під час проведення планових регламентних робіт, ремонтів за допомогою тестового діагностування, а також під час проведення енергетичних аудитів, як наслідок, виявлення дефектів, що зароджуються, та запобігання ушкодженню, аж до створення аварійної ситуації, стає неможливе.

Тому розробка системи оцінки технічного стану силових кабельних ліній є актуальною задачею, так як впровадження автоматизованої системи постійного й більш інформативного моніторингу та діагностики стану силового електрообладнання дозволяє підвищити надійність та ефективність експлуатації такого устаткування.

*Аналіз останніх досліджень.* В праці [1] зазначено, що діагностика й моніторинг силових кабелів - це визначення стану ізоляції і гарнітур кабельних ліній, на підставі чого приймається рішення щодо продовження експлуатації, ремонту або заміни кабелів. В порівнянні з випробуваннями кабелі майже не піддаються навантаженню, і тому не виникає пробою можливих слабких місць кабелю.

Вітчизняні та зарубіжні виробники випускають широкий спектр приладів і комплексів для діагностики кабельних ліній, що відрізняються за призначенням, за метрологічними характеристиками й точністю, при чому застосування мікропроцесорних приладів контролю дозволило підвищити точність вимірювань й достовірність результатів моніторингу. Слід відзначити, що в праці [2] розглянута доцільність використання інформаційно-вимірювальних систем і комплексів, які дозволяють збирати вимірювальну інформацію з первинних перетворювачів, обробляти та зберігати її, а також робити аналіз результатів моніторингу стану кабельних ліній з метою прийняття рішень щодо подальшої експлуатації. Автори зазначають, що інформація за даними інформаційно-вимірювальних систем й комплексів є достатньою і більш достовірною в порівнянні з даними, отриманими при діагностуванні виведеної з роботи силової кабельної лінії, але вимагає автоматизації процесів обробки і аналізу даних на основі використання експлуатаційного досвіду, а також отримання

об'єктивних оцінок стану ліній без участі персоналу й без впливу його кваліфікації.

Впровадження системи автоматизованого контролю стану ізоляції силових кабельних ліній з використанням в ній інтелектуальних методів на основі математичного апарату нечіткої логіки на основі змодельованих міркувань експертів, є ефективним шляхом у вирішенні проблеми підвищення надійності силових кабельних ліній в процесі експлуатації [3]. За думкою автора, так як обробка вимірювальної інформації орієнтується на комп'ютерні системи та обчислювальні алгоритми, тому можна стверджувати, що теорія нечіткої логіки та нечітких множин є однією з основ створення розумних електроенергетичних систем Smart Grid [3].

В працях [4, 5] детально здійснений аналіз результатів дослідження процесу теплового зношування ізоляції силового кабелю та визначено, що теплове зношування ізоляції кабелю,  $E_{Ti}$ , описується аналітичною залежністю

$$E_{Ti} = \int_0^{t_i} \varepsilon \left( \frac{1}{\Theta_H} - \frac{1}{\tau_y \cdot T + \mathcal{G}_{сер} + 273} \right) dt, \quad (1)$$

де  $\varepsilon$  – фактична швидкість теплового зношування ізоляції;

$B$  – коефіцієнт, що характеризує клас ізоляції кабелю;

$\Theta_H$  – номінальна температура оболонки кабелю;

$\tau_y$  – усталене перевищення температури ізоляції оболонки кабелю;

$T$  – постійна часу нагрівання кабелю;

$\mathcal{G}_{сер}$  – поточне значення температури навколишнього середовища.

Усталене перевищення температури ізоляції оболонки кабелю визначається за виразом

$$\tau_y = \tau_H \cdot \frac{\kappa_i^2}{1 - \alpha \cdot \tau_H \cdot (\kappa_i^2 - 1)}, \quad (2)$$

де  $\tau_H$  – номінальне перевищення температури ізоляції оболонки кабелю;

$\alpha$  – температурний коефіцієнт опору матеріалу жил кабелю;

$\kappa_i^2$  – квадрат кратності струму, як квадрат відношення фактичного та тривало допустимого струму кабелю згідно [6].

При температурі, що дорівнює тривало допустимій температурі ізоляції оболонки, теплове зношування можна вважати прийнятним. У випадку перевищення величини фактичної температури ізоляції

величини тривало допустимої температури теплове старіння ізоляції відбувається більш інтенсивно. При перевищенні фактичної температури ізоляції величини максимально допустимої температури стрімко пошкоджується ізоляція, що й призводить до її пробою.

Тому, як параметр діагностики та моніторингу процесу теплового зношування ізоляції кабелю, приймається квадрат кратності струму, що передається по силовому кабелю [6].

#### *Формулювання цілей статті.*

Метою дослідження було обґрунтування структури автоматизованого комплексу контролю стану ізоляції силових кабельних ліній на основі цифрової технології, який повинен забезпечувати збір і раціональне використання вимірювальної інформації про параметри діагностики та моніторингу, що характеризують стан ізоляції контрольованих силових кабельних ліній.

*Основна частина.* Авторами пропонується модель автоматизованого комплексу контролю стану ізоляції кабельних ліній, яка містить структурні блоки згідно структурної схеми контролю з нечітким логічним контролером [3], при цьому об'єктом контролю є силова кабельна лінія (рис.1).

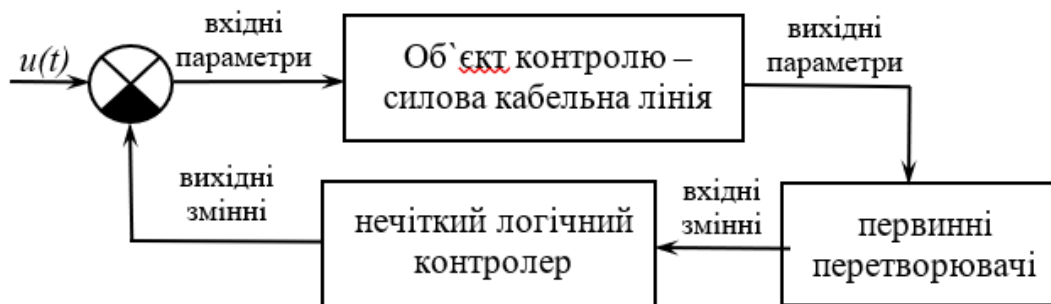


Рисунок 1. Структурна схема контролю з нечітким логічним контролером

На рисунку 2 наведена схема структурна автоматизованого комплексу контролю стану ізоляції кабельних ліній.

До складу автоматизованого комплексу контролю стану ізоляції кабельних ліній входять блок первинних перетворювачів струму (БППС), блок контролю напруги (БКН) та мікропроцесорний пристрій контролю ізоляції (МПКІ), який містить:

- блок прийому та обробки вимірювальної інформації з БППС (БПОІ);
- блок нечіткого логічного контролю (БНЛК) на базі мікроконтролеру (МК);
- блок цифрової індикації (БЦІ);

- комунікаційний порт для зв'язку з пристроями зовнішньої пам'яті (КП);
- блок вводу даних контролю й налаштування (БВДтаН).

Розглянемо кожен блок автоматизованого комплексу контролю стану ізоляції кабельних ліній більш детально.

Складовими блоку первинних перетворювачів струму є вимірювальні трансформатори струму, які контролюють лінійні струми, що проходять по контрольованій кабельній лінії. Вимірювальні трансформатори струму через затискачі первинної обмотки підключаються до контрольованої кабельної лінії, а до затискачів вторинної обмотки вимірювальних трансформаторів струму підключаються блоки прийому та обробки вимірювальної інформації, які забезпечують перетворення вторинних струмів в аналоговий вимірювальний сигнал за напругою.

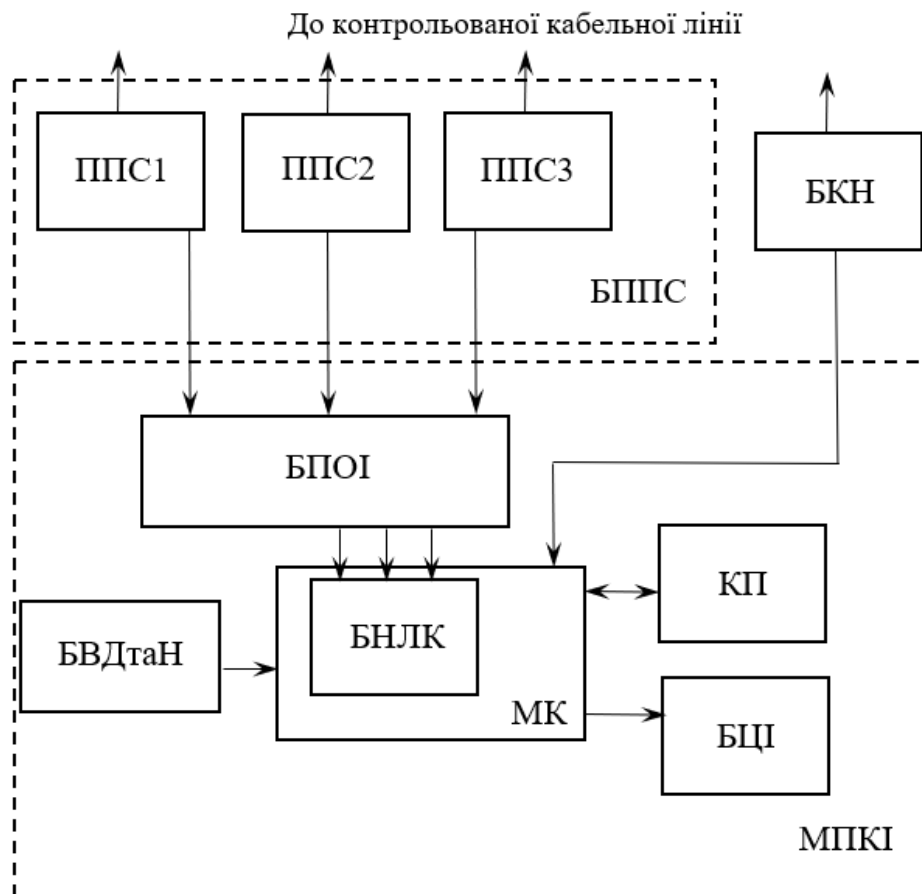


Рисунок 2. Схема структурна автоматизованого комплексу контролю стану ізоляції кабельних ліній

На процес теплового зношування ізоляції силового кабелю впливає температура її нагрівання при протіканні струмів, а саме, струмів навантаження, струму зворотної послідовності основної частоти, струму вищих гармонік з частотою більш, ніж 50 Гц. За

теоретичними положеннями, що наведені [7, 8, 9], причиною виникнення в контрольованій кабельній лінії струмів зворотної,  $I_2$ , та нульової,  $I_0$ , послідовностей є несиметричний характер навантаження, при цьому найбільших значень несиметрія напруг сягає в місті підключення несиметричного навантаження.

Тому, поява струмів зворотної та нульової послідовностей однозначно пов'язана з процесами, що протікають в ізоляції силової кабельної лінії, що й дозволить мати додаткову інформацію для оцінки її стану в процесі експлуатації.

Аналітичні вирази для розрахунку величин лінійних струмів при несиметричному навантаженні, що живиться силовою кабельною лінією, мають вигляд [9]

$$\overset{\square}{I}_A = \overset{\square}{I}_1 + \overset{\square}{I}_2; \quad \overset{\square}{I}_B = a^2 \cdot \overset{\square}{I}_1 + a \cdot \overset{\square}{I}_2; \quad \overset{\square}{I}_C = a \cdot \overset{\square}{I}_1 + a^2 \cdot \overset{\square}{I}_2, \quad (3)$$

де  $\overset{\square}{I}_A$ ,  $\overset{\square}{I}_B$ ,  $\overset{\square}{I}_C$  - комплекси лінійних струмів;  $\overset{\square}{I}_1$  - комплекс струму прямої послідовності;  $\overset{\square}{I}_2$  - комплекс струму зворотної послідовності;  $a$  – оператор трифазної системи.

Якщо визначити суму векторів струму усіх послідовностей для кожної фази, то запис струмів фаз через величини струмів прямої,  $I_1$ , зворотної,  $I_2$ , та нульової,  $I_0$ , послідовностей й кутів зсуву фаз для прямої, зворотної та нульової послідовностей,  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_0$ , відповідно, буде мати вигляд

$$\overset{\square}{I}_A = \overset{\square}{I}_{A1} + \overset{\square}{I}_{A2} + \overset{\square}{I}_{A0} = \overset{\square}{I}_1 e^{j(0+\varphi_1)} + \overset{\square}{I}_2 e^{j(0+\varphi_2)} + \overset{\square}{I}_0 e^{j\varphi_0}; \quad (4)$$

$$\overset{\square}{I}_B = \overset{\square}{I}_{B1} + \overset{\square}{I}_{B2} + \overset{\square}{I}_{B0} = \overset{\square}{I}_1 e^{j\left(-\frac{2\pi}{3}+\varphi_1\right)} + \overset{\square}{I}_2 e^{j\left(\frac{2\pi}{3}+\varphi_2\right)} + \overset{\square}{I}_0 e^{j\varphi_0}; \quad (5)$$

$$\overset{\square}{I}_C = \overset{\square}{I}_{C1} + \overset{\square}{I}_{C2} + \overset{\square}{I}_{C0} = \overset{\square}{I}_1 e^{j\left(\frac{2\pi}{3}+\varphi_1\right)} + \overset{\square}{I}_2 e^{j\left(-\frac{2\pi}{3}+\varphi_2\right)} + \overset{\square}{I}_0 e^{j\varphi_0}; \quad (6)$$

$$\overset{\square}{I}_N = \overset{\square}{I}_A + \overset{\square}{I}_B + \overset{\square}{I}_C = 3 \cdot \overset{\square}{I}_0 e^{j\varphi_0}, \quad (7)$$

де  $\overset{\square}{I}_N$  - комплекс струму в нульовому проводі.

При виникненні струмів зворотної та нульової послідовностей необхідно контролювати напругу хоча б однієї з фаз щодо нульового проводу, тому пропонується застосувати подільник напруги, з виходу якого буде подаватися електричний сигнал на вхід мікропроцесорного пристрою контролю ізоляції (рис.3).

Доцільність застосування блоку нечіткого логічного контролю пояснюється новизною та кращою стійкістю, ніж традиційні регулятори [10, 11], при цьому нечітка логіка функціонує за

принципами фазифікації (перетворення на нечіткий формат), обробки даних та дефазифікації [12, 13].

На рисунку 3 наведена блок-схема операцій формування рішення блоком нечіткого логічного контролю.

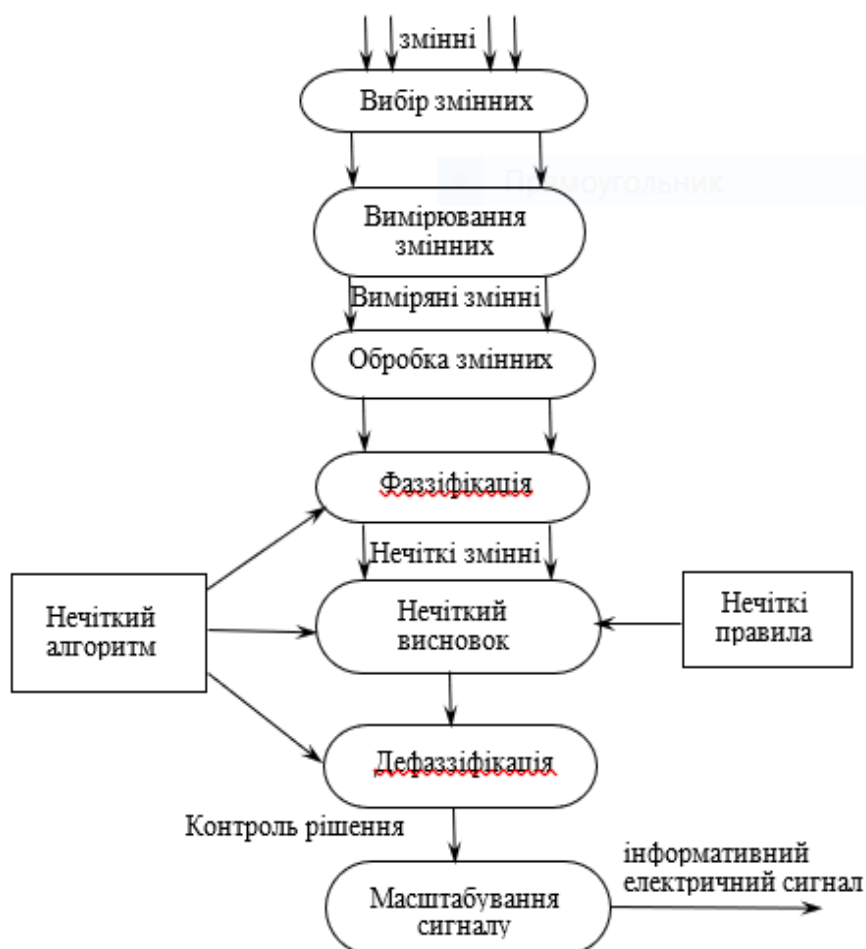


Рисунок 3. Блок-схема операцій формування рішення блоком нечіткого логічного контролю

Стан ізоляції безпосередньо впливає на надійність роботи електроустановок та надійність електропостачання в цілому. При вирішенні таких завдань використання апарату нечіткої логіки, який дозволяє більш повно врахувати всі механізми, що діють на ізоляцію навантажень і зовнішніх умов, виявляється дуже ефективним.

Блок нечіткого логічного контролю на базі мікроконтролера містить пристрій сполучення мікроконтролера з об'єктом керування – аналого-цифровий перетворювач (АЦП) та цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП). Авторами пропонується практично реалізувати блок нечіткого логічного контролю на базі сучасних мікроконтролерів AVR корпорації Atmel, Atmega 323, так як мікроконтролери сімейства AVR відрізняються високою швидкістю і низьким енергоспоживанням.





Для апаратної реалізації автоматизованого комплексу контролю стану ізоляції кабельних ліній пропонується до застосування база на основі платформи Arduino, що є інструментом для проектування електронних пристроїв, що більш щільно взаємодіють з навколишнім фізичним середовищем, ніж стандартні персональні комп'ютери, які фактично не виходять за рамки віртуальності. Така платформа здійснює фізичні обчислення з відкритим програмним кодом та побудована на простій друкованій платі з сучасним середовищем і програмним забезпеченням [14]. Мікроконтролери AVR плат Arduino мають шестиканальний АЦП, що виконаний на послідовному наближенні з аналоговим комутатором, при чому дозвіл такого перетворювача становить 10 біт, тобто забезпечує отримання на його виході  $2^{10}$  значень [10]. Для проведення вимірювань аналогових електричних сигналів в пристроях на основі плат Arduino програмними засобами виконується підключення комутатору до обраного аналогового входу плати, а потім створюється керуючі сигнали для роботи аналого-цифрового перетворювача АЦП, після завершення перетворення на якому виставляється відповідний цифровий сигнал.

Мікропроцесорний пристрій контролю ізоляції, як складова частина автоматизованого комплексу контролю стану ізоляції кабельних ліній, здійснює розпізнавання несправностей кабельної лінії й надає рекомендації для реалізації подальших дій.

На рисунку 4 наведена блок-схема алгоритму функціонування комплексу контролю стану ізоляції кабельних ліній, що забезпечує автоматизоване діагностування стану ізоляції контрольованих кабельних ліній. Блоки первинних перетворювачів струму (БПДС) та контролю напруги (БКН) й мікропроцесорний пристрій контролю ізоляції (МПКІ) встановлюються на початку кабельної лінії та на її кінцевій ділянці. На початку лінії вирішується питання компенсації впливу опору ізоляції приєднання, яке живить контрольована кабельна лінія. В цьому випадку виникнення струмів зворотної та нульової послідовності в контрольованій лінії буде однозначно пов'язане з процесами, що протікають в її ізоляції, і дозволить мати додаткову інформацію для оцінки її стану.

При однаковому стані ізоляції лінії і приєднання не можна однозначно встановити джерело появи даних струмів.

Для вирішення цієї проблеми пропонується використовувати блоки розробленого комплексу й на кінцевій ділянці кабельної лінії.



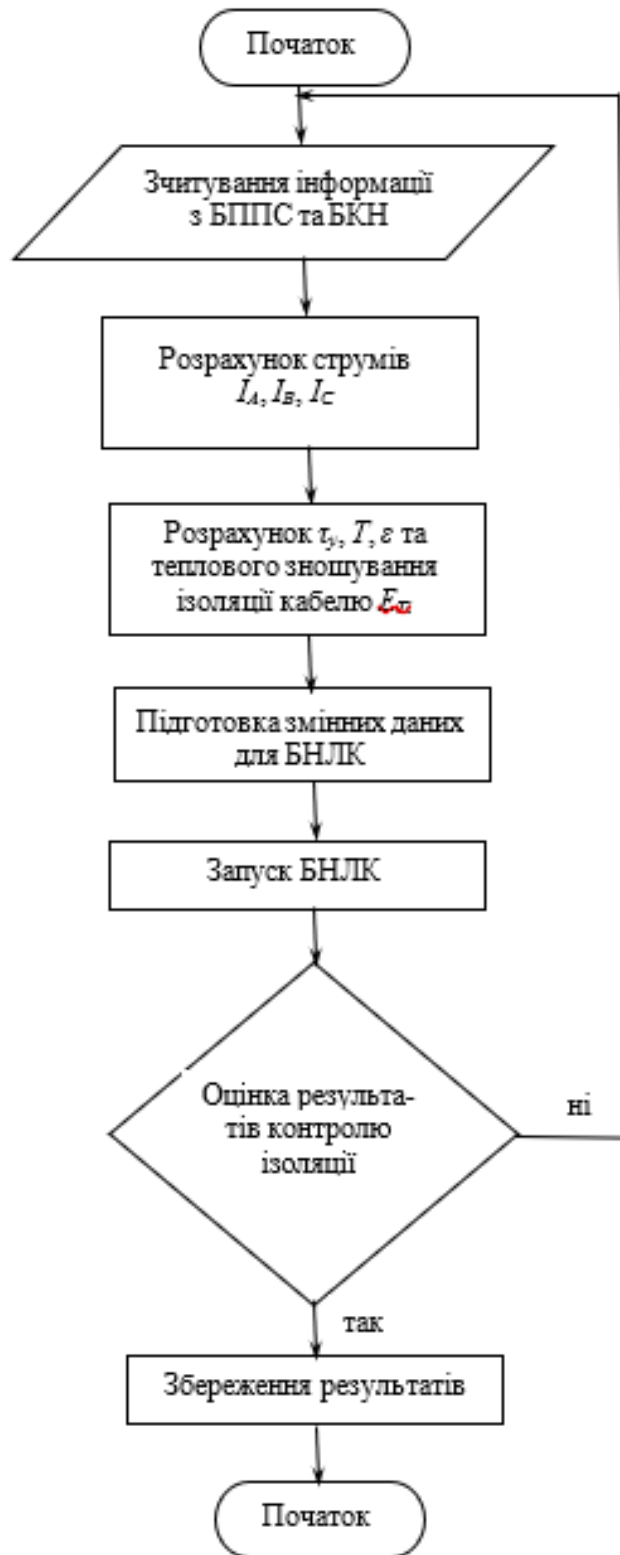


Рисунок 4. Блок-схема алгоритму функціонування

*Висновки.* Запропонована модель автоматизованого комплексу контролю силових кабельних ліній для нечіткої системи оцінки стану ізоляції дозволить підвищити експлуатаційну надійність силових кабельних ліній в процесі експлуатації.



## Список використаних джерел

1. Євтух П. С., Михайлов О. В., Вакуленко О. О. Діагностика силових кабельних ліній, особливості та проблеми, що виникають під час експлуатації. *Актуальні задачі сучасних технологій*: матеріали IV Міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів (м. Тернопіль, 25-26 листопада 2015 р.). Тернопіль, 2015. С. 117-118.
2. Теоретичні основи інформаційно-вимірювальних систем: підручник / В. П. Бабак та ін.; за ред. В. П. Бабака. Київ: Ун-т новітніх технологій НАУ, 2017. 496 с.
3. Кирик В. В. Математичний апарат штучного інтелекту в електроенергетичних системах: підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Політехніка, 2019. 224 с.
4. Овчаров В. В. Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве. Киев: УСХА, 1990. 168 с.
5. Зализный Д. И., Прохоренко С. Н. Математическая модель тепловых процессов силового одножильного кабеля. *Вестник ГТТУ им. П.О. Сухого*, 2012. № 3. С. 25-34.
6. Правила улаштування електроустановок. Київ: Видавництво Міненерговугілля України, 2017. 617 с.
7. Овчаров В. В. Теоретичні основи електротехніки. Мелітополь: Люкс, 2007. Ч. 2. 215 с.
8. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник. Москва: Гардарики, 2007. 701 с.
9. Попова І. О., Нестерчук Д. М., Попрядухін В. С. Аналіз впливу несиметричних навантажень на режими роботи трифазного асинхронного електродвигуна. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки*. Харків, 2017. Вип. 186: Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. С. 85-87.
10. Кондратець В. О., Кропивка В. В., Когай В. О. Використання нечітких регуляторів при автоматичному керуванні технологічними процесами. *Автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології та проблеми енергоефективності в промисловості і сільському господарстві (АКІТ-2018)*: Матеріали міжнар. наук.-практ. Інтернет-конф. Кропивницький, 2018. С. 39-40.
11. Лобода О. І. Нечіткі адаптивні ПІД-регулятори та методика їх настроювання. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2017. Вип. 7, т. 1. С. 162-167.
12. Tanaka K., Wang H. O. Fuzzy Control System Design and Analysis: A Liner Matrix Inequality Approach. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001. 305 p.



13. Von Altrock C. Fuzzy Logic and Neuro Fuzzy Applications Explained. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall PTR, 1995. 368 p.

14. Петин В. А. Проекты с использованием контроллера Arduino. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2014. 400 с.

Стаття надійшла до редакції 30.11.2021 р.

**A. Loboda, D. Nesterchuk**  
**Dmytro Motornyi Tavria state agrotechnological university**

### **AUTOMATED COMPLEX MODEL CONTROL OF POWER CABLE LINES FOR FUZZY EVALUATION SYSTEM INSULATION STATES**

#### *Summary*

The possibility of improving the methodology of diagnosing and monitoring the insulation condition of power cable lines by modeling the structure of the automated control system for a fuzzy insulation assessment system is considered.

The structure of the automated complex is substantiated, which contains a block of primary current converters, a voltage control unit and a microprocessor device for insulation control, and the object of control is a power cable line.

The block diagram of the automated complex of control of a condition of isolation of cable lines and the block diagram of operations of formation of the decision by block of fuzzy logical control is resulted. It is noted that the use of fuzzy logic allows to take more fully into account all the mechanisms acting on the insulation of loads and all external conditions.

For hardware implementation of the automated complex the base on the basis of the Arduino platform is offered for application. The block diagram of the algorithm of functioning of the complex of control of a condition of isolation of cable lines and the places of connection of structural blocks of the automated complex at control of a condition of isolation of a cable line are proved. It is established that the introduction of the proposed model of automated control system will reduce the number and frequency of emergencies, extend the service life of power cable lines and increase their operational reliability.

**Key words:** insulation condition, power cable line, diagnostics and monitoring, automated complex, block diagram, fuzzy logic control unit based on microcontroller, operation algorithm, operational reliability.

**А. И. Лобода, Д. Н. Нестерчук**  
**Таврический государственный агротехнологический университет  
имени Дмитрия Моторного**

### **МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА КОНТРОЛЯ СИЛОВЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ДЛЯ НЕЧЕТКОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ**

#### *Аннотация*

В статье рассмотрена возможность совершенствования методологии диагностирования и мониторинга состояния изоляции силовых кабельных линий



путем моделирования структуры автоматизированного комплекса контроля для нечеткой системы оценки состояния изоляции.

Обоснована структура автоматизированного комплекса, содержащая блок первичных преобразователей тока, блок контроля напряжения и микропроцессорное устройство контроля изоляции, при этом объектом контроля является силовая кабельная линия.

Приведены структурная схема автоматизированного комплекса контроля состояния изоляции кабельных линий и блок-схема операций формирования решения блоком нечеткого логического контроля. Отмечено, что использование аппарата нечеткой логики позволяет более полно учесть все механизмы, действующие на изоляцию нагрузок, и все внешние условия. Для аппаратной реализации автоматизированного комплекса предлагается к использованию база на базе платформы Arduino.

Приведена блок-схема алгоритма функционирования комплекса контроля состояния изоляции кабельных линий и места подключения структурных блоков автоматизированного комплекса при контроле состояния изоляции кабельной линии. Установлено, что внедрение предложенной модели автоматизированного комплекса контроля позволит уменьшить количество и частоту аварийных ситуаций, продлить срок службы силовых кабельных линий и повысить их эксплуатационную надежность.

**Ключевые слова:** состояние изоляции, силовая кабельная линия, диагностирование и мониторинг, автоматизированный комплекс, структурная схема, блок нечеткого логического контроля на базе микроконтроллера, алгоритм функционирования, эксплуатационная надежность.