

**Грабко Валентин Володимирович**, к.т.н., доц., доцент кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, +38(067)262-04-02, vgrabko@gmail.com

*Вінницький національний технічний університет*

*Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021*

**Козаченко Богдан Віталійович**, аспірант кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, +38(063)779-65-39, b.kozachenko23@gmail.com

*Вінницький національний технічний університет*

*Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021*

## **МІКРОПРОЦЕСОРНА РЕАЛІЗАЦІЯ МОДИФІКОВАНОГО ЗАКОНУ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ СИЛОВИМ ТРАНСФОРМАТОРОМ З ПРИСТРОЄМ РЕГУЛЮВАННЯ ПІД НАВАНТАЖЕННЯМ**

***Анотація.** В роботі зазначається, що регулювання напруги в розподільних електричних мережах відбувається за допомогою силових трансформаторів з пристроями регулювання під навантаженням (РПН), які споряджені автоматичними регуляторами. Автоматичні регулятори працюють відповідно до законів регулювання напруги і на них покладені вимоги щодо забезпечення якості напруги та надійності пристроїв РПН. В роботі запропоновано модифікований закон регулювання напруги, який, на відміну від відомих, дозволяє враховувати суттєве відхилення напруги за межі зони нечутливості, обумовлене різкозмінним навантаженням, що дозволяє підвищити якість електропостачання. З використанням мікроконтролера запропоновано реалізацію пристрою та алгоритму роботи для застосування зазначеного закону регулювання напруги. Зроблено висновок про доцільність поєднання задачі регулювання напруги з іншими супутніми задачами управління електротехнічним силовим обладнанням.*

***Ключові слова:** силовий трансформатор, пристрій регулювання під навантаженням, закон регулювання напруги, автоматичний регулятор, мікроконтролер, алгоритм роботи.*

**Grabko Valentyn**, PhD, Docent, Docent of the Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, +38(067)262-04-02, vgrabko@gmail.com

*Vinnitsia National Technical University*

*95 Khmelnytske highway, Vinnitsia, 21021*

**Kozachenko Bohdan**, Postgraduate Student of the Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, +38(063)779-65-39, b.kozachenko23@gmail.com

*Vinnitsia National Technical University*

*95 Khmelnytske highway, Vinnitsia, 21021*

## **MICROPROCESSOR-BASED IMPLEMENTATION OF A MODIFIED VOLTAGE REGULATION LAW BY A POWER TRANSFORMER WITH AN ON-LOAD REGULATION DEVICE**

**Abstract.** *The paper notes that voltage regulation in distribution electrical networks is carried out using power transformers with on-load tap-changer devices (OTP), which are equipped with automatic regulators. Automatic regulators operate in accordance with the laws of voltage regulation and are subject to requirements for ensuring voltage quality and reliability of on-load tap-changer devices. The paper proposes a modified voltage regulation law, which, unlike the known ones, allows taking into account a significant voltage deviation beyond the dead zone due to a sharply changing load, which allows improving the quality of power supply. Using a microcontroller, the implementation of the device and the algorithm of operation for applying the specified voltage regulation law is proposed. The conclusion is made about the feasibility of combining the voltage regulation task with other related tasks of controlling electrical power equipment.*

**Keywords:** *power transformer, load regulation device, voltage regulation law, automatic regulator, microcontroller, operating algorithm.*

**Вступ.** Відомо, що регулювання напруги в розподільних електричних мережах здійснюється за допомогою силових трансформаторів з пристроями регулювання під навантаженням (РПН), які оснащені автоматичними регуляторами [1–5].

Одночасно з появою автоматичних регуляторів було розроблено закони регулювання напруги [6]. В свій час математичну інтерпретацію цих законів сформулював професор Борис Іванович Мокін.

З розвитком електричних мереж та підвищенням вимог по надійності до процесу електропостачання вдосконалювались і закони регулювання напруги, основною задачею яких є підвищення якості електропостачання із забезпеченням зменшення кількості перемикачів пристрою РПН для підвищення надійності його роботи. Очевидно, що ці вимоги є суперечними, а, отже виникає задача пошуку компромісу, який закладається в закон регулювання напруги.

**Постановка проблеми.** Серед сформульованих в свій час законів регулювання напруги силовими трансформаторами з пристроями РПН виділявся закон, в якому введено умову визначення похідної обвідної регульованої напруги з подальшим прийняттям рішення щодо перемикачів відгалуження силового трансформатора, тобто коли, наприклад, значення напруги перевищує верхню допустиму межу і похідна має від'ємний знак, то відгалуження не перемикається, а напруга через деякий час ввійде в зону нечутливості. Аналогічно приймається дзеркальне рішення, коли значення напруги знаходиться нижче допустимої нижньої межі.

Підкреслимо, що такий закон регулювання є досить ефективним при малих відхиленнях напруги поза зоною нечутливості. Але коли значення напруги суттєво віддаляється від межі зони нечутливості, то наведена умова, якою враховується похідна обвідної регульованої напруги, тільки погіршує ситуацію, тому що напруга може досить тривалий час повертатись у межі зони нечутливості, що призводить до погіршення якості напруги для споживачів електроенергії.

Як наслідок, пропонується модифікований закон регулювання напруги, математична модель якого має вигляд

$$u(t) = K_1((U(t) - U_y) - K_2(I(t) - I_{\min}));$$

$$K_m = \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{н.н}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) \leq u_{н.з}; \\ u(t - \tau_3) \leq u_{н.з}; \\ \frac{dU_{об}}{dt} \leq 0; \\ N < N_{гр.}; \end{cases} \text{ або } \begin{cases} u(t) \leq u_{н.з}; \\ u(t - \tau_3) \leq u_{н.з}; \\ N \geq N_{гр.}; \end{cases} \\ \frac{U_i}{U_{н.н}}, \text{ при } u_{н.з} < u(t) < u_{в.з}; \\ \frac{U_{i-1}}{U_{н.н}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) \geq u_{в.з}; \\ u(t - \tau_3) \geq u_{в.з}; \\ \frac{dU_{об}}{dt} \geq 0; \\ N < N_{гр.}; \end{cases} \text{ або } \begin{cases} u(t) \geq u_{в.з}; \\ u(t - \tau_3) \geq u_{в.з}; \\ N \geq N_{гр.}; \end{cases} \end{cases}$$

в якій  $u(t)$  – приведена напруга на шинах низької напруги підстанції з урахуванням струмової компенсації;  $K_1$  – коефіцієнт, який характеризує чутливість регулятора;  $U(t)$  – поточне значення напруги на шинах підстанції;  $U_y$  – уставка регулятора, яка відповідає номінальній нарузі  $U_{ном}$  на шинах підстанції;  $K_2$  – коефіцієнт, який визначає нахил характеристики зустрічного регулювання;  $I_{\min}$  – струм, що знімається з шин підстанції в режимі мінімуму навантаження;  $I(t)$  – поточне значення цього струму;  $K_m$  – коефіцієнт трансформації трансформатора з РПН;  $U_{н.н}$  – напруга на шинах низької напруги трансформатора;  $U_i$  – напруга в обмотці високої напруги трансформатора при підключенні  $i$ -го відгалуження;  $u_{н.з}$ ,

$u_{в.з}$  – нижня і верхня границі зони нечутливості регулятора;  $\tau_3$  – час затримки сигналу на перемикання відгалуження пристроєм РПН; де  $\frac{dU_{об}}{dt}$  – похідна обвідної контрольованої напруги.

Введене значення  $N$  характеризує обчислену суму тангенсів кута нахилу обвідної регульованої напруги за період від моменту виходу напруги за межі зони нечутливості до завершення часу затримки сигналу на перемикання відгалуження. Це значення обчислюється протягом зазначеного періоду через рівні проміжки часу  $n$  разів. Граничне значення  $N_{гр.}$  зазначеної обчисленої суми тангенсу кута  $\alpha$  свідчить про недопустиму якість напруги.

Знак похідної обвідної регульованої напруги визначатимемо по її миттєвому амплітудному значенню.

Підкреслимо, що з розвитком теорії ефективного регулювання напруги в електричних мережах складність законів регулювання підвищується, а тому з врахуванням сучасних тенденції до реалізації будь-яких автоматичних чи автоматизованих засобів доцільно їх реалізувати з використанням мікропроцесорної техніки.

**Метою роботи** є розробка мікропроцесорного пристрою для реалізації модифікованого закону регулювання напруги силовим трансформатором з пристроєм РПН.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Аналізуючи складність викладеної задачі, можемо зробити висновок, що для її реалізації можна використати звичайний 8-розрядний або 16-розрядний мікроконтролер без додаткового використання зовнішньої пам'яті і з типовою кількістю портів введення-виведення інформації. До таких відносяться мікроконтролери, наприклад, з серії AT90 [7] або STM32 [8].

Для повноцінного функціонування пристрою мікроконтролер необхідно підключати, наприклад, по послідовному інтерфейсу в систему диспетчерського керування підстанції. Крім того, з метою коригування даних, оцінки

роботоздатності та інших задач до мікроконтролера необхідно підключати клавіатуру та LCD дисплей.

Як зазначалось, вимірювання регульованої напруги здійснюється для визначення знаку похідної обвідної напруги по її амплітудному значенню. Тому значення вхідної напруги будемо визначати за допомогою вбудованого в мікроконтролер аналого-цифрового перетворювача, вхідні сигнали якого, як правило, вводяться через порт А мікроконтролера. В деяких випадках для забезпечення точності синхронізації зчитування сигналу напруги доцільно також визначати її початкову фазу за допомогою вбудованого компаратора.

Враховуючи те, що сигнал на перемикання пристрою РПН формується автоматичним регулятором, а розроблюваний пристрій формує лише сигнал виконання умов, сформованих в законі регулювання напруги, необхідно дві лінії одного з портів мікроконтролера налаштувати на виведення сигналів – дозволів на перемикання пристрою РПН. В окремих випадках для виведення цих сигналів доцільно застосувати підсилювачі сигналу.

Для зменшення впливу завад логічним є застосування гальванічного розділення між мікроконтролером та колами керування.

З врахуванням викладеного структура мікропроцесорного пристрою для реалізації модифікованого закону регулювання напруги наведена на рис. 1. На схемі: 1 – сенсор напруги; 2 – нормуючий перетворювач; 3 – клавіатура; 4 – мікроконтролер; 5 – LCD дисплей; 6, 7 – підсилювачі сигналу; 8 – інтерфейсний блок.

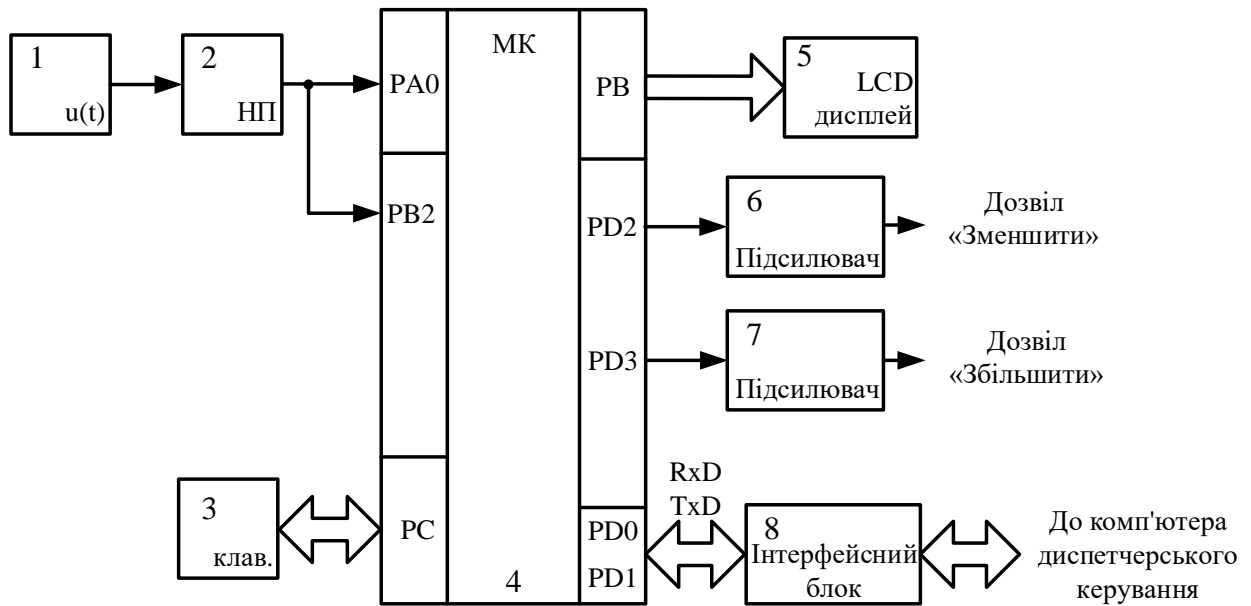


Рисунок 1 – Структурна схема мікропроцесорного пристрою для реалізації модифікованого закону регулювання напруги

У відповідності до представленої структурної схеми мікропроцесорного пристрою розроблено укрупнений алгоритм його функціонування, який наведено на рис. 2.

Функціонування пристрою відповідно до алгоритму пояснюється так:

- в блоках 1, 2 відбувається ініціалізація пристрою та налаштування;
- в блоках 3-5 зчитуються значення напруги та порівнюється з межами зони нечутливості;
- в блоках 6, 7 визначається фаза регульованої напруги, коли остання знаходиться нижче нижньої межі зони нечутливості;
- в блоках 8, 23 значення регульованої напруги перетворюється в цифровий код;
- в блоках 9, 25 відбувається затримка сигналу на час тривалості одного інтервалу визначення похідної обвідної регульованої напруги;
- в блоках 10-12, 25-27 повторно зчитується значення напруги, визначається її фаза та перетворення напруги в цифровий код;
- в блоках 13, 14, 28, 29 знаходиться похідна обвідної напруги, обчислюється тангенс кута нахилу обвідної та його запис в регістр;

- в блоках 15, 30 відбувається нарощування індексу врахування кількості інтервалів знаходження тангенсу кута та індексу часу затримки на перемикання пристрою РПН;

- в блоках 16, 17, 31, 32 перевіряється кількість інтервалів знаходження тангенсу кута нахилу обвідної та тривалість часу затримки на перемикання;

- в блоках 18, 33 відбувається порівняння накопиченого значення тангенсу кута нахилу обвідної з допустимим значенням;

- в блоках 19, 34 визначається знак похідної обвідної регульованої напруги;

- в блоці 20 формується дозвіл «збільшити» на перемикання автоматичним регулятором пристрою РПН;

- в блоках 21, 22 визначається фаза регульованої напруги, коли остання знаходиться вище верхньої межі зони нечутливості;

- в блоці 35 формується дозвіл «зменшити» на перемикання автоматичним регулятором пристрою РПН.

Очевидно, що задачу регулювання напруги відповідно до модифікованого закону регулювання логічно пов'язати з виконанням інших задач, наприклад, діагностування пристрою РПН силового трансформатора [9], релейного захисту тощо на базі одного мікроконтролера. У разі нестачі апаратних ресурсів можливо для такого класу задач використати інший потужніший мікроконтролер або, наприклад, промисловий логічний контролер.

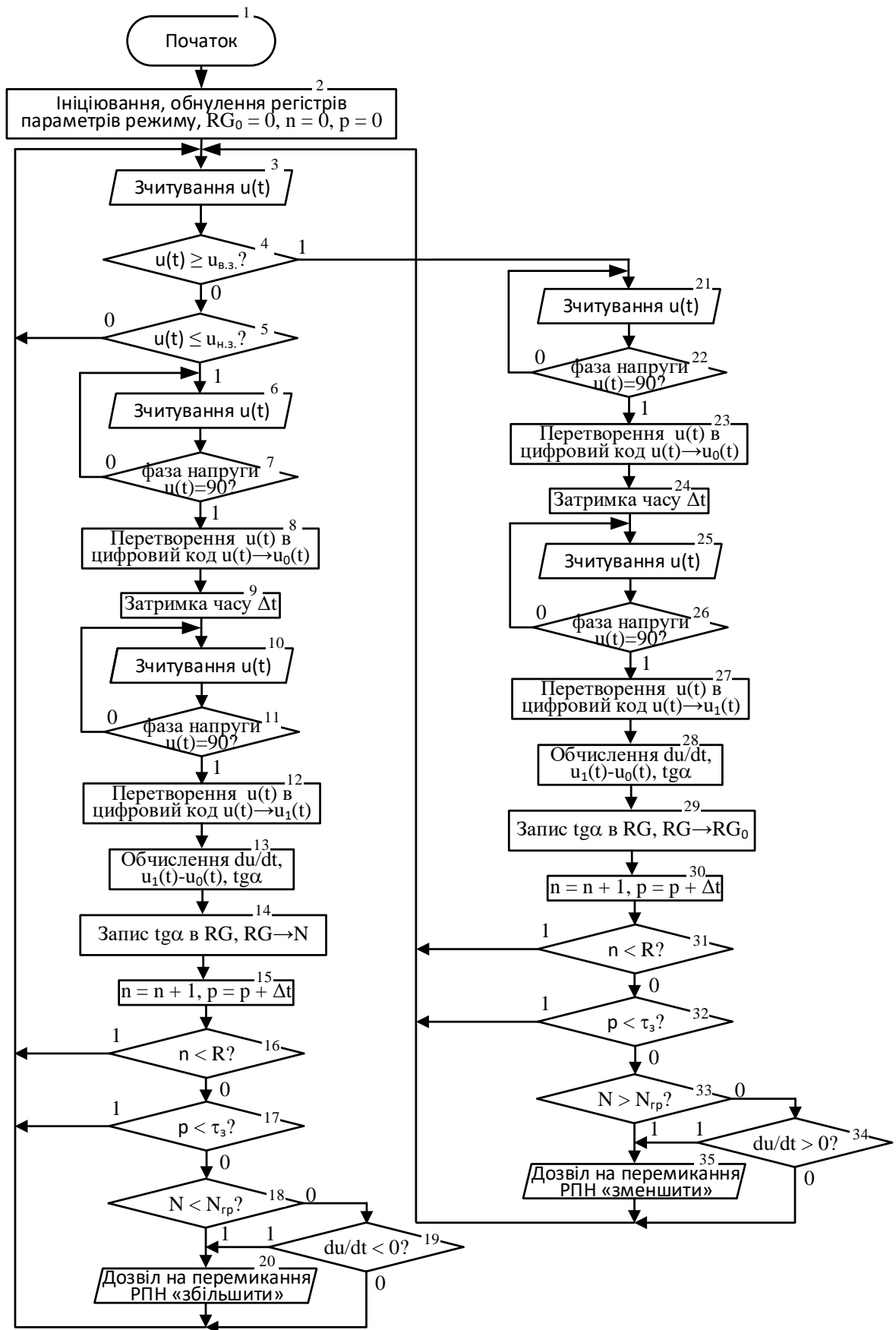


Рисунок 2 – Укрупнений алгоритм роботи мікроконтролера для реалізації модифікованого закону регулювання напруги

**Висновки.**

На основі запропонованого модифікованого закону регулювання напруги силовим трансформатором з пристроєм РПН розроблено пристрій з використанням мікроконтролера для реалізації зазначеного закону регулювання напруги. Запропоновано поєднувати реалізацію декількох задач такого класу на базі одного обчислювального засобу.

**БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:**

1. Сегеда М. С. *Електричні мережі та системи : підручник*, Нац. ун-т «Львів. політехніка», 3-тє вид., перероб. та доп., Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2015. 540 с.
2. G. Leci, I.G. Kuliš, M. Bago, V. Kirinčić Automatic Voltage Control of OLTC Power Transformers between Substations - 5<sup>th</sup> PAC World Conference, 2014.
3. Lee, H.O.; Kim, D.J.; Kim, C.S.; Kim, B.K. Optimal Voltage Control Method for a Step Voltage Regulator Considering the Under-Load Tap Changer in a Distribution System Interconnected with a Renewable Energy Source. *Energies*, 2023. 16. 6039.
4. Hanmin Lim, Jongmin Jo and Kwan-Ho Chun Optimal On-Load Tap Changer Tap Control Method for Voltage Compliance Rate Improvement in Distribution Systems, Based on Field Measurement Data. *Energies*, 2025. 18(2). 439.
5. On-load tap-changers voltage regulators, REG-D(A) [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zta.energy/en/catalog/on-load-tap-changers-voltage-regulators-reg-d-a/>. Дата звернення 20.03.2026.
6. Грабко В. В., Бальзан І.В. *Електротехнічний комплекс регулювання напруги трансформатором з РПН*: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2016. 126 с.
7. AT90S8535 Datasheet [Electronic resource] Available at: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/120563/ATMEL/AT90S8535.html> (Accessed: March 20, 2026).
8. STM32-E407 Datasheet [Electronic resource] Available at: <https://www.alldatasheet.com/html-pdf/609366/ETC2/STM32-E407/1569/15/STM32-E407.html> (Accessed: March 20, 2026).
9. Грабко В.В., Грабко В.В., Козаченко Б.В. «Мікропроцесорний засіб для оцінювання робочого ресурсу пристрою регулювання під навантаженням» *Енергетика. Енергозбереження. Енергоаудит*, 2025. №6(209). С. 3–11.

**REFERENCES:**

1. Segeda M. S. *Electrical networks and systems: a textbook*, National university «Lvivska politechnika», 3rd edition revised and supplemented, Lviv: Lvivska politechnika, 2015. 540 p.
2. G. Leci, I.G. Kuliš, M. Bago, V. Kirinčić Automatic Voltage Control of OLTC Power Transformers between Substations - 5<sup>th</sup> PAC World Conference, 2014.
3. Lee, H.O.; Kim, D.J.; Kim, C.S.; Kim, B.K. Optimal Voltage Control Method for a Step Voltage Regulator Considering the Under-Load Tap Changer in a Distribution System Interconnected with a Renewable Energy Source. *Energies*, 2023. 16. 6039.
4. Hanmin Lim, Jongmin Jo and Kwan-Ho Chun Optimal On-Load Tap Changer Tap Control Method for Voltage Compliance Rate Improvement in Distribution Systems, Based on Field Measurement Data. *Energies*, 2025. 18(2). 439.

5. On-load tap-changers voltage regulators, REG-D(A) [Electronic resource]. Available at: <https://zta.energy/en/catalog/on-load-tap-changers-voltage-regulators-reg-d-a/>. (Accessed: March 20, 2026).
6. Grabko V. V., Balzan I. V. *Electrical complex of voltage regulation by transformer with on-load tap-changer: monograph*. Vinnytsia: VNTU, 2016. 126 p.
7. AT90S8535 Datasheet [Electronic resource] Available at: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/120563/ATMEL/AT90S8535.html> (Accessed: March 20, 2026).
8. STM32-E407 Datasheet [Electronic resource] Available at: <https://www.alldatasheet.com/html-pdf/609366/ETC2/STM32-E407/1569/15/STM32-E407.html> (Accessed: March 20, 2026).
9. Grabko V. V., Grabko V. V., Kozachenko B.V. «Microprocessor tool for estimating the operating life of a regulation device under load» [Мікропроцесорний засіб для оцінювання робочого ресурсу пристрою регулювання під навантаженнями]. Energy. Energy saving. Energy audit, 2025. № 6(209). pp. 3–11.

*Стаття надійшла до редакції: 08.02.2026; рецензування: 25.02.2026;  
прийнята до публікації 05.03.2026. Автори прочитали и дали згоду рукопису.*

*The article was submitted on 08.02.2026; revised on 25.02.2026; and accepted for publication on 05.03.2026. The authors read and approved the final version of the manuscript.*