

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-88>

УДК 621.316

**ГРАБКО ВАЛЕНТИН**

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0003-8743-8258>

e-mail: [vgrabko@gmail.com](mailto:vgrabko@gmail.com)

**КОЗАЧЕНКО БОГДАН**

Вінницький національний технічний університет

e-mail: [b.kozachenko23@gmail.com](mailto:b.kozachenko23@gmail.com)

## ДО ПИТАННЯ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ СИЛОВИМ ТРАНСФОРМАТОРОМ З ПРИСТРОЄМ РПН

Вимоги до якісного електропостачання споживачів весь час зростають. Одним із ключових показників якісного електропостачання є відхилення напруги, величина якого змінюється в залежності від навантаження. В розподільних електричних мережах регулювання напруги здійснюється за допомогою силових трансформаторів з пристроєм регулювання під навантаженням (РПН), споряджених автоматичними регуляторами. В залежності від зміни навантаження для підтримання напруги в допустимих межах пристроєм РПН весь час переключаються відгалуження обмоток силового трансформатора, що призводить до витрачання робочого ресурсу останнього, тобто збільшення кількості перемикачів пристрою РПН спричиняє підвищення якості напруги і пониження надійності роботи пристрою РПН.

Для знаходження компромісу між кількістю перемикачів пристрою РПН та якістю напруги живлення споживачів електроенергії розроблено ряд законів регулювання напруги, математичні моделі яких враховують вихід напруги за межі допустимих зон, затримку сигналу на перемикачів пристрою РПН, врахування похідної обвідної регульованої напруги, прогнозування часу входження напруги в зону нечутливості та інші. В більшості випадків зазначені умови дозволяють мінімізувати кількість перемикачів пристрою РПН за умови припустимої якості електропостачання. Однак коли навантаження має різкозмінний характер, кількість перемикачів пристрою РПН зростає для забезпечення допустимого значення напруги.

В роботі запропоновано математичну модель закону регулювання напруги, якою передбачається визначення тангенсу кута обвідної регульованої напруги декілька разів протягом часу затримки сигналу на перемикачів автоматичного регулятора, що дозволяє оцінити наскільки регульована напруга перевищує межі її допустимих значень. І коли напруга суттєво відрізняється від допустимого значення, то сигнал на перемикачів пристрою РПН подається одразу ж після завершення часу затримки сигналу на перемикачів. Якщо регульована напруга незначно перевищує межі допустимих значень, то за умови визначення знаку похідної обвідної регульованої напруги формується сигнал на перемикачів, коли похідна обвідної напруги спрямована від зони нечутливості. В протилежному разі перемикачів пристрою РПН не відбувається. Такий підхід дозволяє підвищити якість напруги та децю зменшити кількість перемикачів пристрою РПН, що підвищує надійність його роботи.

Розроблено пристрій, що дозволяє в сукупності з автоматичним регулятором напруги реалізувати запропонований закон регулювання напруги.

**Ключові слова:** регулювання напруги, силовий трансформатор, пристрій регулювання під навантаженням, математична модель, пристрій.

**GRABKO VALENTYN, KOZACHENKO BOHDAN**

Vinnitsia National Technical University

## ON THE ISSUE OF VOLTAGE REGULATION BY A POWER TRANSFORMER WITH AN ON-LOAD REGULATOR

The requirements for high-quality electricity supply to consumers are constantly growing. One of the key indicators of high-quality electricity supply is voltage deviation, the value of which varies depending on the load. In distribution electrical networks, voltage regulation is carried out using power transformers with on-load tap changers (OLTC) equipped with automatic regulators. Depending on the load change, in order to maintain the voltage within acceptable limits, the on-load tap changer constantly switches the branches of the power transformer windings, which leads to the depletion of the latter's working resource, i.e. an increase in the number of on-load tap changer switching operations leads to an improvement in voltage quality and a decrease in the reliability of the on-load tap changer.

In order to find a compromise between the number of OLTC switching operations and the quality of the supply voltage to electricity consumers, a number of voltage regulation laws have been developed, the mathematical models of which take into account the voltage output outside the permissible ranges, the signal delay for switching the OLTC, the derivative of the regulated voltage envelope, the prediction of the time of voltage entry into the insensitivity zone, and others. In most cases, these conditions allow minimising the number of OLTC switching operations while maintaining acceptable power supply quality. However, when the load is highly variable, the number of OLTC switching operations increases to ensure an acceptable voltage value.

The paper proposes a mathematical model of the voltage regulation law, which involves determining the tangent of the envelope angle of the regulated voltage several times during the signal delay time for switching the automatic regulator, which allows assessing how much the regulated voltage exceeds its permissible limits. And when the voltage differs significantly from the permissible value, the signal for switching the OLTC device is sent immediately after the end of the signal delay time for switching. If the regulated voltage slightly exceeds the permissible limits, then, provided that the sign of the derivative of the regulated voltage envelope is determined, a switching signal is generated when the derivative of the envelope voltage is directed away from the insensitivity zone. Otherwise, the OLTC device does not switch. This approach improves voltage quality and slightly reduces the number of OLTC device switches, which increases its reliability.

A device has been developed that, in conjunction with an automatic voltage regulator, implements the proposed voltage regulation law.

**Keywords:** voltage regulation, power transformer, on-load regulation device, mathematical model, device.

Стаття надійшла до редакції / Received 07.12.2025

Прийнята до друку / Accepted 11.02.2026

Опубліковано / Published 26.03.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Грабко Валентин, Козаченко Богдан

### Вступ

Відомо, що в кожен певний період часу зростають вимоги до показників якості електроенергії, серед яких одним із ключових показників є відхилення напруги [1].

Рівень напруги визначається електричним навантаженням, яке має змінний характер, а тому для утримання напруги у споживачів електроенергії на відповідному рівні її в електричній мережі необхідно регулювати [2, 3].

В розподільних електричних мережах регулювання напруги здійснюється за допомогою силових трансформаторів зі змінним коефіцієнтом трансформації, відгалуження для перемикачів в яких виконується, як правило в обмотці високої напруги. Такі трансформатори споряджаються пристроями регулювання під навантаженням (РПН), які забезпечують зміну коефіцієнта трансформації без розриву струму та напруги живлення на споживачах [4, 5, 6].

### Аналіз відомих рішень

Для автоматичного регулювання напруги силові трансформатори з пристроями РПН комплектуються автоматичними регуляторами, що в комплексі можуть забезпечувати регулювання напруги в режимі стабілізації, зустрічного керування або стабілізації за заданим графіком напруги.

Очевидно, що пристрої РПН в процесі експлуатації витрачають свій робочий ресурс, внаслідок чого можливе виникнення аварійних ситуацій. Для підвищення якості напруги живлення необхідно частіше перемикачати відгалуження силового трансформатора пристроєм РПН.

Досвідчений оперативний персонал зацікавлений в тому, щоб кількість перемикачів пристроєм РПН була мінімальною при відповідній якості електроенергії, або, принаймні, якість напруги живлення споживачів електроенергії несуттєво відрізнялась від допустимих меж.

Відомі літературні джерела, наприклад [7], в яких розв'язуються задачі регулювання напруги в розподільних електричних мережах з використанням силових трансформаторів з пристроями РПН, що споряджені автоматичними регуляторами напруги [8, 9, 10, 11].

Відомо, що в теперішній час використовуються мікропроцесорні регулятори, в яких окрім функцій регулювання напруги поєднані і інші задачі, зокрема системної автоматизації, діагностування тощо [12, 13, 14].

### Постановка задачі

З появою автоматичних регуляторів було сформовано закони регулювання напруги, математична модель найпростішого з яких представлена в різних літературних джерелах і має вигляд

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

$$K_m = \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{н.н}}, & \text{якщо } u(t) \leq u_{н.з}; \\ \frac{U_i}{U_{н.н}}, & \text{при } u_{н.з} < u(t) < u_{в.з}; \\ \frac{U_{i-1}}{U_{н.н}}, & \text{якщо } u(t) \geq u_{в.з}; \end{cases} \quad (1)$$

де  $u(t)$  – 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 напрузі  $U_{ном}$  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, які задаються з умов надійності. При цьому

$$K_2 = \frac{0,05U_{ном}}{I_{minmax}}, \quad (2)$$

де  $I_{max}$  – значення струму навантаження в режимі максимального навантаження.

Враховуючи те, що механічний пристрій РПН в процесі перемикачів відгалужень витрачає свої технічні характеристики, було запропоновано інший закон регулювання напруги, в якому введено часову затримку  $\tau_3$  і логічну умову, якими ігноруються короткочасні коливання напруги, а перемикачів пристроєм РПН відбувається лише за наявності відхилень напруги. Такий підхід дозволяє зменшити кількість перемикачів відгалужень обмоток трансформатора і підвищити в деякій мірі надійність роботи пристроєм РПН. Зауважимо, що при цьому оперативний персонал свідомо погоджується на деяке погіршення якості регулювання напруги.

Математичний вираз зазначеного закону регулювання напруги має вигляд

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

$$K_m = \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{н.н}}, & \text{якщо } \begin{cases} u(t) \leq u_{н.з}; \\ u(t - \tau_3) \leq u_{н.з}; \end{cases} \\ \frac{U_i}{U_{н.н}}, & \text{при } u_{н.з} < u(t) < u_{в.з}; \\ \frac{U_{i-1}}{U_{н.н}}, & \text{якщо } \begin{cases} u(t) \geq u_{в.з}; \\ u(t - \tau_3) \geq u_{в.з}; \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

де  $\tau_3$  – час затримки сигналу на перемикачів відгалуження пристроєм РПН.

Пізніше для підвищення стійкості регулювання в математичну модель (3) була введена додаткова логічна умова, якою враховується знак похідної обвідної  $U_{об}$  регульованої напруги  $U(t)$ . Це дозволило не перемикати відгалуження трансформатора, коли напруга знаходиться за межами зони нечутливості регулятора, але в залежності від навантаження похідна її обвідної спрямована в зону нечутливості. Математична модель такого закону регулювання напруги має вигляд:

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

$$K_m = \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{н.н}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) \leq u_{н.з}; \\ u(t - \tau_3) \leq u_{н.з}; \\ \frac{dU_{об}}{dt} \leq 0; \end{cases} \\ \frac{U_i}{U_{н.н}}, \text{ при } u_{н.з} < u(t) < u_{в.з}; \\ \frac{U_{i-1}}{U_{н.н}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) \geq u_{в.з}; \\ u(t - \tau_3) \geq u_{в.з}; \\ \frac{dU_{об}}{dt} \geq 0; \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

де  $\frac{dU_{об}}{dt}$  – похідна обвідної контрольованої напруги.

Слід зазначити, що математичні вирази представлених вище законів регулювання напруги в свій час були розроблені професором Борисом Івановичем Мокінім.

В процесі експлуатації описаних систем регулювання напруги з'ясувалось, що коли напруга виходить за межі зони нечутливості, наприклад, вверх, а похідна обвідної напруги приймає від'ємне значення, то не завжди логічною є умова, згідно з якою перемикати відгалуження обмотки трансформатора не має потреби, а сама регульована напруга через деякий час увійде в зону нечутливості регулятора. Справа у тому, що регульована напруга може досить тривалий час наближатися до зони нечутливості а, отже, якість напруги для споживачів довгий період виходитиме за допустимі значення.

У цьому випадку можна скористатися іншим підходом, яким передбачається визначення по обвідній напруги часу можливого входження напруги в зону нечутливості. При цьому якщо обвідна напруги змінюється стрімко у напрямку зони нечутливості і час входження напруги в зону нечутливості прийнятний, то перемикати відгалуження обмотки трансформатора не має потреби. В іншому випадку, коли обвідна напруги змінюється повільно, час входження напруги в зону нечутливості є недопустимим для якісного електропостачання і, отже, необхідно здійснювати перемикання відгалуження пристроєм РПН.

Відповідно до наведеного опису математична модель закону регулювання напруги має вигляд [7]:

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

$$K_m = \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{н.н}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) \leq u_{н.з}; \\ u(t - \tau_3) \leq u_{н.з}; \\ \frac{dU_{об}}{dt} \leq 0; \end{cases} \text{ або } \begin{cases} u(t) \leq u_{н.з}; \\ u(t - \tau_3) \leq u_{н.з}; \\ \frac{dU_{об}}{dt} > 0; \\ T \geq T_{доп.}; \end{cases} \\ \frac{U_i}{U_{н.н}}, \text{ при } u_{н.з} < u(t) < u_{в.з}; \\ \frac{U_{i-1}}{U_{н.н}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) \geq u_{в.з}; \\ u(t - \tau_3) \geq u_{в.з}; \\ \frac{dU_{об}}{dt} \geq 0; \end{cases} \text{ або } \begin{cases} u(t) \geq u_{в.з}; \\ u(t - \tau_3) \geq u_{в.з}; \\ \frac{dU_{об}}{dt} < 0; \\ T \geq T_{доп.}; \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

де  $T$  – розрахунковий час, протягом якого напруга увійде в зону нечутливості;  $T_{доп}$  – допустимий час, відповідно до якого напруга матиме понижену якість з врахуванням умов надійності роботи пристрою РПН.

Наведеним законом регулювання напруги не враховується ще одна особливість роботи електричних мереж, коли при різкозмінному навантаженні напруга весь час коливається, змінюючи знак її обвідної. Тобто, коли напруга знаходиться поза зоною нечутливості і протягом тривалого часу то збільшується, то зменшується, регулятор формує команди на перемикання пристрою РПН, які не тільки не покращують якість електропостачання, а ще й погіршують. В такому випадку жоден із представлених законів регулювання напруги не дозволяє ефективно відпрацьовувати процес регулювання напруги споживачів електроенергії.

#### Формулювання цілі статті

**Метою роботи** є розробка математичної моделі закону регулювання напруги, який дозволяє формувати коректні керуючі дії регулятора в умовах різкозмінного навантаження, а, отже, за наявності різких коливань напруги.

#### Виклад основного матеріалу

Побудуємо математичну модель закону регулювання напруги, яка відображає коректне регулювання напруги в умовах різкозмінного навантаження та виникнення різнознакових коливань напруги.

Характер можливих коливань напруги ілюструється на рисунку 1. Розглянемо випадок, коли напруга виходить за межі верхньої зони нечутливості регулятора. Аналогічні міркування будуть при аналізі ситуації, коли напруга виходить за межі нижньої зони нечутливості.

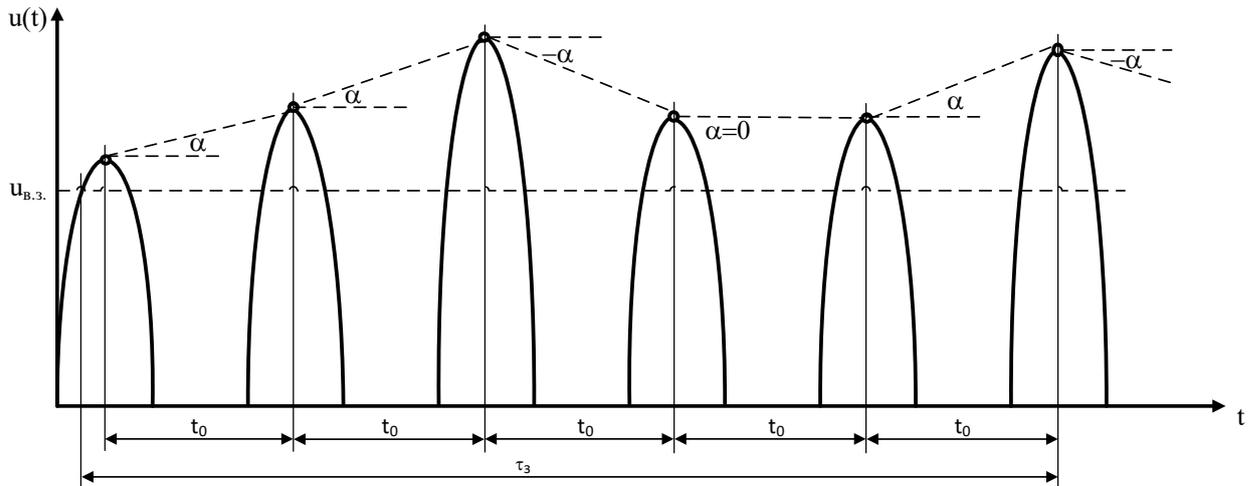


Рис. 1. Ілюстрація прикладу коливань напруги

Нагадаємо, що перед виконанням перемикання відгалуження обмотки трансформатора регулятор формує затримку сигналу на час  $\tau_3$ .

В даній роботі пропонується часовий інтервал затримки сигналу розділити на  $n$  рівних частин тривалістю  $t_0$  кожна. Протягом кожного інтервалу обчислюємо тангенс кута  $\alpha$  ( $\text{tg } \alpha$ ) нахилу обвідної регульованої напруги, запам'ятовуємо ці значення та здійснюємо алгебраїчне додавання їхніх значень. Зауважимо, що обчислення тангенс кута  $\alpha$  відбувається не по сусідніх напівхвилях напруги – інтервал для обчислення вибирається суттєво більший. При цьому знаходимо точку, яка характеризує рівень напруги на кінець інтервалу, обумовленого часом затримки сигналу  $\tau_3$ .

Таким чином відтворюється тренд зміни обвідної регульованої напруги.

Позначимо сумарне значення результату обчислення тангенса кута  $\alpha$  літерою

$$N = \sum_{i=1}^n \text{tg } \alpha. \quad (6)$$

Очевидно, що коли характер коливань напруги має переважно зростаюче значення, то на момент закінчення часу затримки значення регульованої напруги може мати суттєве підвищення на межі зони нечутливості. І у цьому випадку не має значення, який знак має обвідна регульованої напруги. В будь-якому випадку для підвищення якості напруги необхідно здійснювати перемикання відгалуження пристроєм РПН. Якщо ж сумарне підраховане значення  $\text{tg } \alpha$  свідчить, що напруга хоч і знаходиться за межами зони нечутливості, але несуттєво перевищує це значення і знак обвідної регульованої напруги від'ємний, то, очевидно, відгалуження перемикає не має потреби. Таким чином можливо підвищити якість напруги живлення і дещо зменшити кількість перемикань пристрою РПН, що підвищує надійність його експлуатації та системи регулювання напруги в цілому.

Аналогічні міркування можна застосувати і у випадку, коли регульована напруга знаходиться нижче нижньої межі зони нечутливості регулятора.

Відповідна математична модель закону регулювання напруги має вигляд, наведений нижче:

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

$$K_m = \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{н.н}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) \leq u_{н.з}; \\ u(t - \tau_3) \leq u_{н.з}; \\ \frac{dU_{об}}{dt} \leq 0; \\ N < N_{гр.}; \end{cases} \text{ або } \begin{cases} u(t) \leq u_{н.з}; \\ u(t - \tau_3) \leq u_{н.з}; \\ N \geq N_{гр.}; \end{cases} \\ \frac{U_i}{U_{н.н}}, \text{ при } u_{н.з} < u(t) < u_{г.з}; \\ \frac{U_{i-1}}{U_{н.н}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) \geq u_{г.з}; \\ u(t - \tau_3) \geq u_{г.з}; \\ \frac{dU_{об}}{dt} \geq 0; \\ N < N_{гр.}; \end{cases} \text{ або } \begin{cases} u(t) \geq u_{г.з}; \\ u(t - \tau_3) \geq u_{г.з}; \\ N \geq N_{гр.}; \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

де  $N_{гр.}$  – граничне значення обчисленої суми тангенсу кута  $\alpha$ , перевищення якого свідчить про недопустиму якість напруги з врахуванням умов надійності роботи пристрою РПН (визначається для конкретних умов експлуатації).

Здійснено реалізацію запропонованого закону регулювання напруги, що описується виразом (7), з використанням елементів електроніки низького ступеню інтеграції. Фактично в структуру пристрою введемо лише такі компоненти, які відтворюють особливості закону регулювання напруги (7) та не враховані в роботі типового автоматичного регулятора напруги пристроєм РПН.

Структурна схема пристрою, яким в поєднанні з автоматичним регулятором напруги в каналі «зменшити» формується команда для перемикавання пристрою РПН, наведена на рис. 2.

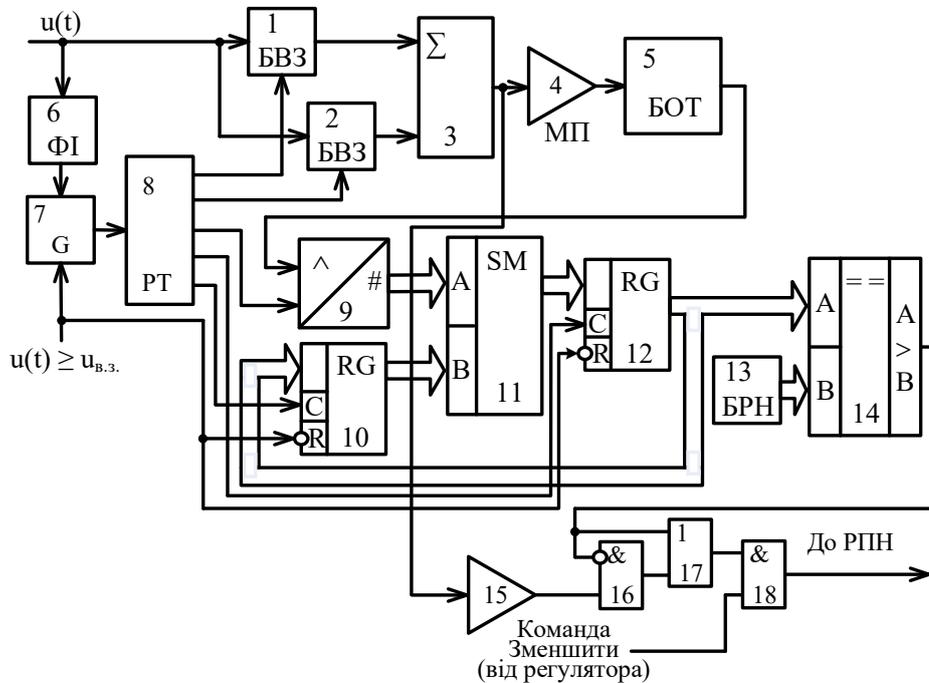


Рис. 2. Структурна схема каналу «зменшити» пристрою для реалізації закону регулювання напруги (7)

На схемі введені такі позначення: 1, 2 – блоки вибірки зберігання; 3 – суматор; 4 – масштабуючий підсилювач; 5 – блок обчислення тангенсу кута; 6 – формувач імпульсів; 7 – генератор імпульсів; 8 – розподільвач тактів; 9 – аналого-цифровий перетворювач; 10 – регістр; 11 – цифровий суматор; 12 – регістр; 13 – блок рівня напруги; 14 – цифровий суматор; 15 – компаратор; 16, 18 – логічні елементи І; 17 – логічний елемент АБО.

Відповідно до структурної схеми (рис.2) розглянемо роботу пристрою, який призначений для формування команди «зменшити» в поєднанні з автоматичним регулятором напруги. Канал формування команди «збільшити» є ідентичним.

Робота пристрою сумісно з регулятором напруги розпочинається в момент виходу регульованої напруги за межі зони нечутливості. При цьому сигналом з регулятора напруги розблоковується робота тригерів 10 та 12, цей же сигнал надходить також на вхід генератора імпульсів 7, внаслідок чого останній починає формувати послідовність імпульсів. Це призводить до появи почергово на виходах розподільвача тактів 8 імпульсів, що забезпечують роботу пристрою. Зауважимо, що формувач імпульсів 6 призначений для відстеження фази синусоїдного сигналу регульованої напруги та синхронного формування відповідних керуючих імпульсів.

Почергово сигналами з першого та другого виходів розподільвача тактів 8 в блоках вибірки зберігання 1 та 2 фіксуються значення амплітуд регульованої напруги, різниця яких обчислюється в суматорі 3. Зазначена різниця сигналів подається через масштабуючий підсилювач 4 на вхід блока обчислення тангенсу кута 5, вихідне значення якого надходить в аналого-цифровий перетворювач 9, де по імпульсу з третього виходу розподільвача тактів 8 зазначений сигнал перетворюється в цифрову форму. При виході регульованої напруги за зону нечутливості в перший момент часу в регістрах 10 та 12 зберігається нульовий цифровий код, а тому код з виходу аналого-цифрового перетворювача 9 надходить на вхід цифрового суматора 11 і по імпульсу з четвертого виходу розподільвача тактів 8 записується в регістр 12 та через деякий час перезаписується в регістр 10 по черговому імпульсу з розподільвача тактів 8. Таким чином в регістр 10 введено число, що відповідає першому значенню тангенсу кута  $\alpha$  відповідно до нахилу обвідної регульованої напруги на першому інтервалі спостереження за зміною тренду напруги.

На цьому перший цикл вимірювання та перетворення сигналу завершується і розпочинається другий. Тепер в процесі вимірювання регульованої напруги та перетворення її в цифровий код в цифровому суматорі

11 відбувається додавання поточного значення тангенсу кута  $\alpha$  з попереднім, що зберігається в регістрі 10, та записується в регістр 12. Таким чином за період часу затримки сигналу регулятора в регістрі 12 накопичується загальне значення алгебраїчної суми значень тангенсу кута  $\alpha$  у вигляді цифрового коду. І якщо це значення перевищує код, що записаний в блоці рівня напруги 13, то на виході цифрового компаратора 14 з'являється сигнал, яким одразу через логічні елементи АБО 17 та І 18 відкривається дозвіл на проходження сигналу від регулятора до РПН для виконання команди «зменшити».

У разі, коли по завершенню часу затримки сигналу на виході цифрового компаратора 14 присутній сигнал логічного нуля, що означає порівняно невелике відхилення регульованої напруги за межами зони нечутливості, то сигналом з компаратора 15 відкривається логічний елемент 16 і через логічні елементи АБО 17 та І 18 надається дозвіл на перемикання пристрою РПН, коли обвідна регульованої напруги має знак (в даному випадку додатній), що визначається роботою автоматичного регулятора.

Очевидно, що структура пристрою для пояснення роботи каналу «збільшити» регулятора в процесі регулювання напруги з використанням пристрою РПН та логіка його функціонування буде ідентичною до наведеної вище.

Зазначимо також, що запропоновану в роботі реалізацію вищезгаданого пристрою можна здійснити у мікропроцесорному виконанні, а у разі використання мікропроцесорного автоматичного регулятора розроблений закон регулювання напруги можливо реалізувати програмним шляхом та інтегрувати в структуру регулятора.

### Висновки

1. Здійснено аналіз математичних моделей законів регулювання напруги за допомогою силових трансформаторів з пристроями РПН.
2. Розроблена математична модель закону регулювання напруги для врахування тренду коливання напруги живлення при її виході за межі зони нечутливості регулятора напруги.
3. Синтезована структура пристрою для реалізації запропонованого закону регулювання напруги в поєднанні з типовим автоматичним регулятором напруги.
4. Реалізація запропонованого закону регулювання напруги дозволяє підвищити якість напруги для споживачів електроенергії та дещо зменшити кількість перемикань пристрою РПН, що дозволяє підвищити надійність його роботи та покращити культуру експлуатації електроенергетичного обладнання в цілому.

### Література

1. Остапчук О. В., Денисюк П. Л., Матеєнко Ю. П. Електрична частина станцій та підстанцій: курс лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спец. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електрон. текст. дані (1 файл: 4,62 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 183 с.
2. Сегеда М. С. Електричні мережі та системи : підручник / Нац. ун-т «Львівська політехніка». – 3-те вид., перероб. та доп. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2015. – 540 с.
3. European Smart Grids Technology Platform // European Commission. Directorate-General for Research Sustainable Energy System. – EUR 22040. – 2006. – 44 p.
4. Guide for life management techniques for power transformers / CIGRE Working Group A2.18. – Paris : CIGRE, 2003. – 128 p.
5. Трансформатори силові, пристрої перемикання відгалужень обмоток трансформаторів РПН під навантаженням типів PS, SDV, SCV, SAV : ГКД 34.46.401-96 : метод. вказівки з налагодження / М-во енергетики України. – Київ : ДонОРГРЕС, 2003. – 50 с.
6. Орлович А. Ю., Плешков П. Г., Козловський О. А., Співак О. В., Котиш А. І., Величко Т. В. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання / М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : Видавець Лисенко В. Ф., 2019. – 272 с.
7. Грабко В. В., Бальзан І. В. Електротехнічний комплекс регулювання напруги трансформатором з РПН : монографія. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 126 с.
8. Leci G., Kuliš I. G., Bago M., Kirinčić V. Automatic voltage control of OLTC power transformers between substations // *Proceedings of the 5th PAC World Conference*. – 2014.
9. 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. – Vol. 16. – P. 6039.
10. Yoon K. H., Shin J. W., Nam T. Y., Kim J. C., Moon W. S. Operation method of on-load tap changer on main transformer considering reverse power flow in distribution system connected with high penetration on photovoltaic system // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. – P. 6473.
11. Lim H., Jo J., Chun K.-H. Optimal on-load tap changer tap control method for voltage compliance rate improvement in distribution systems, based on field measurement data // *Energies*. – 2025. – Vol. 18, No. 2. – P. 439.
12. Автоматика, управління та показник положення РПН в одному пристрої РС83-В4 з новими можливостями [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://rzasystems.com/2022/07/11/AVTOMATYKA-UPRAVLINNYA-I-POKAZHCHYK-POLOZHENNYA-RPN/> (дата звернення: 10.02.2026).

13. Пристрої регулювання напруги трансформатора під навантаженням MRZS-R [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://rza-promav.com/product/prystroi-reguljuvannja-naprugi-transformatora-pid-navantazhennjam/mrzs-r-3/> (дата звернення: 10.02.2026).

14. 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: 10.02.2026).

### References

1. Ostapchuk O. V., Denysiuk P. L., Mateienko Yu. P. Elektrychna chastyna stantsii ta pidstantsii: kurs lektsii [Elektronnyi resurs] : navch. posib. dlia stud. spets. 141 «Elektroenerhetyka, elektrotekhnika ta elektromekhanika» / KPI im. Ihoria Sikorskoho. – Elektron. tekst. dani (1 fail: 4,62 Mbait). – Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2022. – 183 s.
2. Sehedra M. S. Elektrychni mrezhy ta systemy : pidruchnyk / Nats. un-t «Lvivska politekhnika». – 3-tie vyd., pererob. ta dop. – Lviv : Vyd-vo Lvivskoi politekhniki, 2015. – 540 s.
3. European Smart Grids Technology Platform // European Commission. Directorate-General for Research Sustainable Energy System. – EUR 22040. – 2006. – 44 p.
4. Guide for life management techniques for power transformers / CIGRE Working Group A2.18. – Paris : CIGRE, 2003. – 128 p.
5. Transformatory sylovi, prystroi peremykannia vidhaluzhen obmotok transformatoriv RPN pid navantazhenniam typiv PS, SDV, SCV, SAV : HKD 34.46.401-96 : metod. vkazivky z nalahodzhennia / M-vo enerhetyky Ukrainy. – Kyiv : DonORHRES, 2003. – 50 s.
6. Orlovych A. Yu., Plieshkov P. H., Kozlovskiy O. A., Spivak O. V., Kotysh A. I., Velychko T. V. Elektrychne obladnannia pidstantsii system elektropostachannia / M-vo osvity i nauky Ukrainy, Tsentralnoukr. nats. tekhn. un-t. – Kropyvnytskyi : Vydavets Lysenko V. F., 2019. – 272 s.
7. Hrabko V. V., Balzan I. V. Elektrotekhnichniy kompleks rehuliuвання napruhy transformatorom z RPN : monohrafiia. – Vinnytsia : VNTU, 2016. – 126 s.
8. Leci G., Kuliš I. G., Bago M., Kirinčić V. Automatic voltage control of OLTC power transformers between substations // Proceedings of the 5th PAC World Conference. – 2014.
9. 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. – Vol. 16. – P. 6039.
10. Yoon K. H., Shin J. W., Nam T. Y., Kim J. C., Moon W. S. Operation method of on-load tap changer on main transformer considering reverse power flow in distribution system connected with high penetration on photovoltaic system // Energies. – 2022. – Vol. 15. – P. 6473.
11. Lim H., Jo J., Chun K.-H. Optimal on-load tap changer tap control method for voltage compliance rate improvement in distribution systems, based on field measurement data // Energies. – 2025. – Vol. 18, No. 2. – P. 439.
12. Avtomatyka, upravlinnia ta pokazhchyk polozhennia RPN v odnomu prystroi RS83-V4 z novyvy mozhyvostiamy [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://rzasystems.com/2022/07/11/AVTOMATYKA-UPRAVLINNYA-I-POKAZHCHYK-POLOZHENNYA-RPN/> (data zvernennia: 10.02.2026).
13. Prystroi rehuliuвання napruhy transformatora pid navantazhenniam MRZS-R [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://rza-promav.com/product/prystroi-reguljuvannja-naprugi-transformatora-pid-navantazhennjam/mrzs-r-3/> (data zvernennia: 10.02.2026).
14. On-load tap-changers voltage regulators, REG-D(A) [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://zta.energy/en/catalog/on-load-tap-changers-voltage-regulators-reg-d-a/> (data zvernennia: 10.02.2026).