

**Грабко Володимир Віталійович**, д.т.н., проф., професор кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, +38(097)602-48-20, [vgrabko@gmail.com](mailto:vgrabko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-4666-1758

*Вінницький національний технічний університет  
Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021*

**Грабко Валентин Володимирович**, к.т.н., доц., доцент кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, +38(067)262-04-02, [gvv.1982@gmail.com](mailto:gvv.1982@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](mailto:b.kozachenko23@gmail.com)

*Вінницький національний технічний університет  
Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021*

## СИНТЕЗ СТРУКТУРИ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ РОБОЧОГО РЕСУРСУ ПРИСТРОЮ РЕГУЛЮВАННЯ ПІД НАВАНТАЖЕННЯМ

***Анотація.** В роботі зосереджено увагу на пристроях регулювання під навантаженням (РПН) силових трансформаторів, від надійності роботи яких залежить надійність передачі електроенергії. Зроблено акцент на необхідності контролю за витрачанням механічного ресурсу, який залежить від кількості перемикачів контактів пристрою РПН, та комутаційного ресурсу, що залежить від значення комутованого струму в момент перемикачів відгалужень. З використанням математичного апарату секвенцій синтезовано структуру пристрою для оцінювання витрачання механічного та комутаційного ресурсів пристрою РПН в процесі його експлуатації.*

***Ключові слова:** силовий трансформатор, пристрій регулювання під навантаженням, оцінювання робочого ресурсу, структура пристрою.*

**Grabko Volodymyr**, Dr Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, +38(097)602-48-20, [vgrabko@gmail.com](mailto:vgrabko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-4666-1758.

*Vinnitsia National Technical University  
95, Khmelnytske shose, Vinnitsia, 21021*

**Grabko Valentyn**, PhD, Docent, Docent of the Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, +38(067)262-04-02, [gvv.1982@gmail.com](mailto:gvv.1982@gmail.com)

*Vinnitsia National Technical University  
95, Khmelnytske shose, Vinnitsia, 21021*

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

*Vinnitsia National Technical University  
95, Khmelnytske shose, Vinnitsia, 21021*

## SYNTHESIS OF THE STRUCTURE OF THE DEVICE FOR ASSESSING THE WORKING RESOURCE OF THE REGULATORY DEVICE UNDER LOAD

**Abstract.** *The work focuses on on-load regulation devices (on-load tap-changer) of power transformers, on the reliability of which the reliability of electricity transmission depends. Emphasis is placed on the need to control the consumption of the mechanical resource, which depends on the number of switches of the tap-changer device contacts, and the switching resource, which depends on the value of the commutated current at the moment of branch switching. Using the mathematical apparatus of sequences, the structure of the device was synthesized for evaluating the consumption of mechanical and switching resources of the on-load tap-changer during its operation.*

**Keywords:** *power transformer, device for regulation under the load of evaluation of the working resource, structure of the device*

**Вступ.** Відомо, що силові трансформатори відносяться до основного електрообладнання в тракті передачі електроенергії [1, 2], а тому до них ставляться особливі вимоги по надійності функціонування [3].

Відомо також, що силові трансформатори, як і інше електрообладнання, мають обмежений робочий ресурс, при вичерпанні якого настає період, коли подальша їх експлуатація може призвести до непрогнозованих наслідків з пошкодженням обладнання, недовідпуску електроенергії тощо.

Для дослідження технічного стану силових трансформаторів застосовуються різні підходи, якими передбачається перевірка їх технічних параметрів в періоди профілактичних оглядів та ремонтів з умовою виведення силових трансформаторів з роботи, а також методи моніторингу технічного стану, якими передбачається неперервний контроль технічних характеристик та їх допустимих відхилень без суттєвого погіршення експлуатаційного стану силових трансформаторів [4, 5].

**Постановка проблеми.** Статистика використання силових трансформаторів свідчить про те, що значна доля їх пошкоджень приходить на пристрій регулювання під навантаженням (РПН), у якому в першу чергу виходять з ладу контактор (із-за ерозії контактів внаслідок перемикання відгалужень з комутацією певних значення струмів) та привод [6, 7]. Очевидно, що робочий ресурс контактів відгалужень витрачається нерівномірно і в першу чергу зношуються контакти, які частіше беруть участь у перемиканні.

Відомо багато підходів до визначення роботоздатності пристроїв РПН, аналіз яких та деякі реалізації засобів оцінки технічного стану наведені, наприклад, в роботі [8].

Тому підвищення надійності роботи пристрою РПН силового трансформатора в процесі його роботи є актуальною задачею.

Підкреслимо, що робочий ресурс пристрою РПН силового трансформатора складається з двох компонентів – механічного та комутаційного ресурсів. Механічний ресурс обумовлений витривалістю механічних блоків внаслідок багаторазового перемикання відгалужень.

Комутаційний ресурс витрачається при кожній комутації нерівномірно в залежності від значення комутуваного струму. Очевидно, що чим більше значення комутуваного струму, тим швидше витрачається робочий ресурс контактів.

**Метою роботи** є розроблення структури засобу для оцінювання робочого ресурсу пристрою РПН.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для реалізації поставленої мети врахуємо деякі зауваження.

Пристроєм РПН передбачено перемикання на декілька відгалужень «вверх» і «вниз» від середнього положення, при якому коефіцієнт трансформації силового трансформатора є номінальним. Зрозуміло, що для дослідження технології побудови пристрою для оцінювання робочого ресурсу пристрою РПН достатньо розглянути процес перемикання відгалужень лише в одному напрямку від середнього положення, наприклад, «вверх». Очевидно також, що для аналізу достатньо розглядати процес перемикання лише двох відгалужень, оскільки процес вичерпання ресурсу інших відгалужень підпорядковується загальному правилу.

Для вимірювання струму в момент комутації пристрою РПН застосуємо сенсор струму. Враховуючи те, що в паспорті пристрою РПН силового трансформатора не наводяться дані залежності кількості комутацій від значення комутуваного струму, прийmemo цю залежність лінійною.

Щоб визначити реальну залежність між кількістю комутацій та значенням комутованого струму в подальшому можливо в процесі експлуатації пристрою РПН на основі статистичних даних його роботи застосувати, наприклад, систему моніторингу з нейронною мережею [9, 10], що дозволить отримати зазначену залежність.

Позначимо літерами В та Н команди на перемикання відгалужень пристроєм РПН відповідно «вверх» або «вниз». Літерою І позначимо значення струму, яке комутується в момент перемикання пристрою РПН.

Будемо аналізувати роботу пристрою РПН для оцінювання його роботи за двома відгалуженнями, які під дією автоматичного регулятора перемикаються «вверх». При цьому достатньо враховувати одне значення комутованого струму. При інших значеннях струму та кількості відгалужень сутність зазначеного аналізу роботи не змінюється.

Для запам'ятовування номера відгалуження введемо в структуру пристрою тригери  $T_1$  та  $T_2$ , а для запам'ятовування значень комутованого струму та витрачання комутаційного ресурсу по кожному відгалуженню введемо тригери  $T_8$ - $T_{15}$ . Витрачання механічного ресурсу контактів будемо записувати в тригери  $T_3$ - $T_7$ . Позначимо  $\tau_1$  – час, необхідний для перемикання на одне відгалуження пристрою РПН «вверх» або «вниз», а  $\tau_2$  – час, необхідний для фіксації значення комутованого струму.

Позначимо сигнали, що характеризують вичерпання механічного та комутаційного ресурсу пристрою РПН на відповідному відгалуженні, символами  $q_1$  та  $q_2$ . Неузгодженість роботи пристрою РПН, що обумовлена формуванням сигналу від автоматичного регулятора на перемикання «вверх», коли пристрій РПН знаходиться у крайньому верхньому положенні, позначимо  $q_3$ .

З урахуванням зазначених міркувань граф функціонування пристрою для оцінювання робочого ресурсу пристрою РПН зображено на рис. 1.

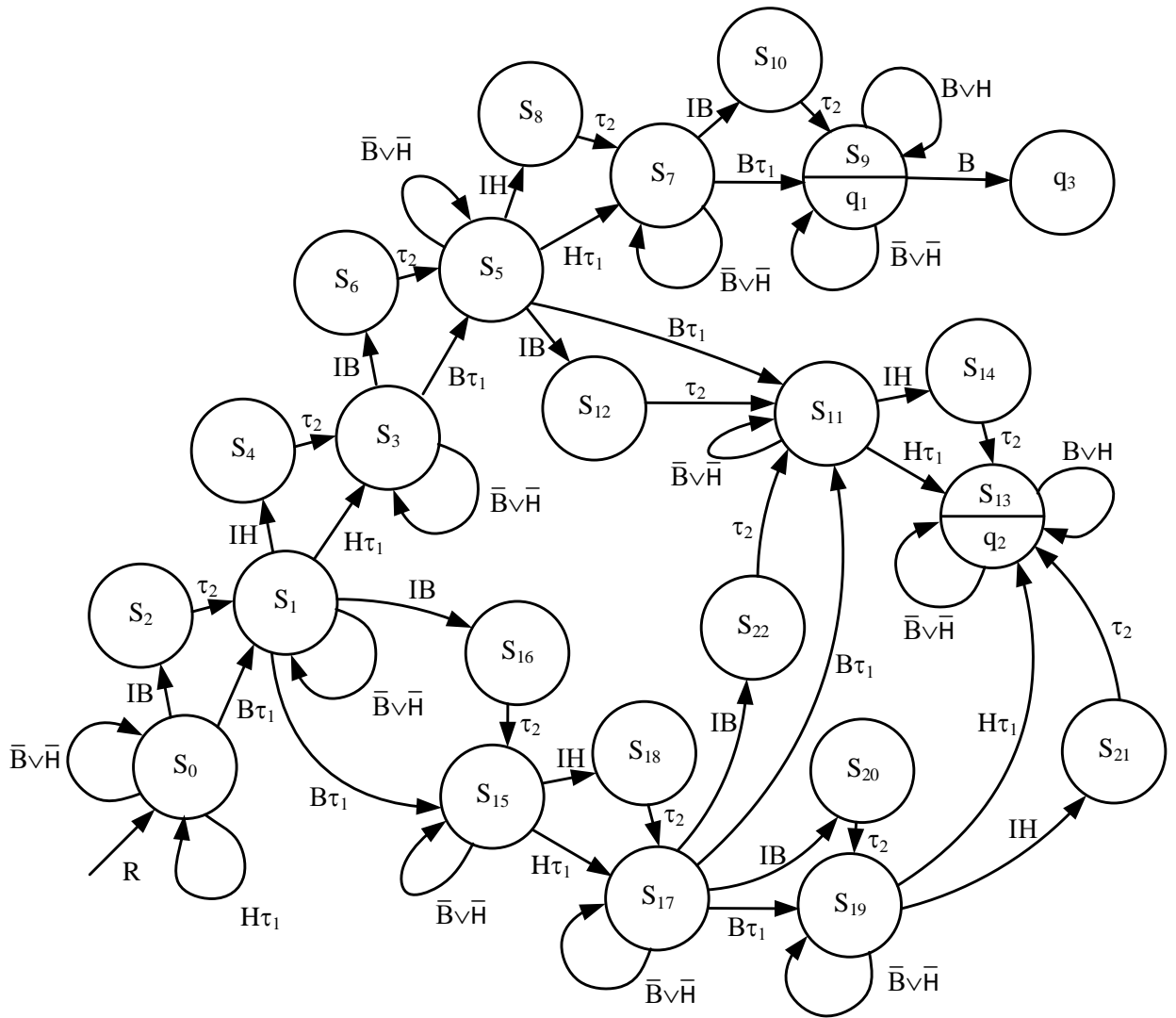


Рисунок 1 – Граф функціонування пристрою для оцінювання робочого ресурсу пристрою РПН

Для синтезу пристрою для оцінювання робочого ресурсу пристрою РПН необхідно відповідно до графа функціонування скласти систему логічних виразів, мінімізувати їх з наступною реалізацією структури пристрою. Враховуючи те, що вищезазначеним графом описується поведінка пристрою з розподіленою пам'яттю, синтез структури пристрою можливо здійснити, скориставшись мовою кінцевих автоматів [11] або, наприклад, застосувати математичний апарат секвенцій, приклад застосування якого наведено в роботах [12, 13].

Здійснимо реалізацію зазначеного пристрою, скориставшись математичним апаратом секвенцій, який в порівнянні з мовою кінцевих автоматів дозволяє формувати компактніші вирази. Представимо логічні залежності, якими описується граф, зображений на рис. 1, секвенціями виду:

$$\left\{ \begin{array}{lll}
 R \vdash S_0; & (\bar{B} \vee \bar{H}) S_7 \vdash S_7; & (\bar{B} \vee \bar{H}) S_{15} \vdash S_{15}; \\
 H\tau_1 S_0 \vdash S_0; & B\tau_1 S_7 \vdash S_9; & H\tau_1 S_{15} \vdash S_{17}; \\
 (\bar{B} \vee \bar{H}) S_0 \vdash S_0; & IB S_7 \vdash S_{10}; & IH S_{15} \vdash S_{18}; \\
 B\tau_1 S_0 \vdash S_1; & \tau_2 S_{10} \vdash S_9; & \tau_2 S_{18} \vdash S_{17}; \\
 IB S_0 \vdash S_2; & (\bar{B} \vee \bar{H}) S_9 \vdash S_9; & (\bar{B} \vee \bar{H}) S_{17} \vdash S_{17}; \\
 \tau_2 S_2 \vdash S_1; & HS_9 \vdash S_9; & B\tau_1 S_{17} \vdash S_{19}; \\
 (\bar{B} \vee \bar{H}) S_1 \vdash S_1; & B\tau_1 S_5 \vdash S_{11}; & IB S_{17} \vdash S_{20}; \\
 H\tau_1 S_1 \vdash S_3; & IB S_5 \vdash S_{12}; & \tau_2 S_{20} \vdash S_{19}; \\
 IH S_1 \vdash S_4; & \tau_2 S_{12} \vdash S_{11}; & (\bar{B} \vee \bar{H}) S_{19} \vdash S_{19}; \\
 \tau_2 S_4 \vdash S_3; & (\bar{B} \vee \bar{H}) S_{11} \vdash S_{11}; & H\tau_1 S_{19} \vdash S_{21}; \\
 (\bar{B} \vee \bar{H}) S_3 \vdash S_3; & H\tau_1 S_{11} \vdash S_{13}; & IH S_{19} \vdash S_{21}; \\
 B\tau_1 S_3 \vdash S_5; & IH S_{11} \vdash S_{14}; & \tau_2 S_{21} \vdash S_{13}; \\
 IB S_3 \vdash S_6; & \tau_2 S_{14} \vdash S_{13}; & B\tau_1 S_{17} \vdash S_{11}; \\
 \tau_2 S_6 \vdash S_5; & (\bar{B} \vee \bar{H}) S_{13} \vdash S_{13}; & IB S_{17} \vdash S_{22}; \\
 (\bar{B} \vee \bar{H}) S_5 \vdash S_5; & (B \vee H) S_{13} \vdash S_{13}; & \tau_2 S_{22} \vdash S_{11}; \\
 H\tau_1 S_5 \vdash S_7; & B\tau_1 S_1 \vdash S_{15}; & S_9 \vdash q_1; \\
 IH S_5 \vdash S_8; & IB S_1 \vdash S_{16}; & S_{13} \vdash q_2; \\
 \tau_2 S_8 \vdash S_7; & \tau_2 S_{16} \vdash S_{15}; & BS_9 \vdash q_3
 \end{array} \right. \quad (1)$$

в яких кожен стан описується математичними виразами (2)

$$\left\{ \begin{array}{l}
 S_0 \in \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10} T_{11} T_{12} T_{13} T_{14} T_{15}}; \\
 S_1 \in \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10} T_{11} T_{12} T_{13} T_{14} T_{15}}; \\
 S_2 \in \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10} T_{11} T_{12} T_{13} T_{14} T_{15}}; \\
 S_3 \in \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10} T_{11} T_{12} T_{13} T_{14} T_{15}}; \\
 S_4 \in \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10} T_{11} T_{12} T_{13} T_{14} T_{15}}; \\
 S_5 \in \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10} T_{11} T_{12} T_{13} T_{14} T_{15}}; \\
 S_6 \in \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10} T_{11} T_{12} T_{13} T_{14} T_{15}}; \\
 S_7 \in \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10} T_{11} T_{12} T_{13} T_{14} T_{15}}; \\
 S_8 \in \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10} T_{11} T_{12} T_{13} T_{14} T_{15}}; \\
 S_9 \in \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10} T_{11} T_{12} T_{13} T_{14} T_{15}}; \\
 S_{10} \in \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10} T_{11} T_{12} T_{13} T_{14} T_{15}}; \\
 S_{11} \in \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10} T_{11} T_{12} T_{13} T_{14} T_{15}}
 \end{array} \right. \quad (2)$$

та (3)

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{12} \in T_1 T_2 \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} \overline{T_{15}}; \\ S_{13} \in T_1 \overline{T_2} T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10} T_{11} T_{12} T_{13} T_{14} \overline{T_{15}}; \\ S_{14} \in T_1 \overline{T_2} T_3 \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} \overline{T_{15}}; \\ S_{15} \in T_1 T_2 T_3 T_4 \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} \overline{T_{15}}; \\ S_{16} \in T_1 T_2 \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} \overline{T_{15}}; \\ S_{17} \in T_1 \overline{T_2} T_3 T_4 T_5 \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} \overline{T_{15}}; \\ S_{18} \in T_1 \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} \overline{T_{15}}; \\ S_{19} \in T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} T_{15}; \\ S_{20} \in T_1 T_2 \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} T_{15}; \\ S_{21} \in T_1 \overline{T_2} T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} T_{15}; \\ S_{22} \in T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} \overline{T_{15}}. \end{array} \right. \quad (3)$$

Підставимо вирази (2) і (3) в (1) та здійснимо логічні перетворення, використовуючи правила мінімізації секвенцій. В результаті отримаємо мінімізовану систему секвенцій (4):

$$\left\{ \begin{array}{ll} R \vdash \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}}; & \\ T_7 \vdash q_1; & B(\overline{T_1} \overline{T_2} \vee T_2 \overline{T_1}) \vdash T_1; \\ T_{14} \vdash q_2; & (B \vee (B \overline{T_1} \overline{T_2} \vee H(T_1 T_2))) I \tau_2 \vdash T_8 \\ B T_1 T_2 \vdash q_3; & H \tau_1 T_2 \vdash T_1; \\ B \tau_1 \overline{T_1} \vdash T_1; & H \tau_1 T_1 \vdash \overline{T_1}; \\ B \tau_1 \overline{T_2} T_1 \vdash T_2; & I B \tau_2 T_8 \vdash T_9; \\ B \tau_1 T_1 \vdash T_3; & I B \tau_2 T_8 T_9 \vdash T_{10}; \\ B \tau_1 T_1 T_3 \vdash T_4; & I B \tau_2 T_8 T_9 T_{10} \vdash T_{11}; \\ B \tau_1 T_1 T_3 T_4 \vdash T_5; & I B \tau_2 T_8 T_9 T_{10} T_{11} \vdash T_{12}; \\ B \tau_1 T_1 T_3 T_4 T_5 \vdash T_6; & I B \tau_2 T_8 T_9 T_{10} T_{11} T_{12} \vdash T_{13}; \\ B \tau_1 T_1 T_3 T_4 T_5 T_6 \vdash T_7; & I B \tau_2 T_8 T_9 T_{10} T_{11} T_{12} T_{13} \vdash T_{14}. \\ B(\overline{T_1} \overline{T_2} \vee T_1 \overline{T_2}) \vdash T_2; & \end{array} \right. \quad (4)$$

За виразами (4) здійснимо перехід від математичних виразів до структури, що містить елементи пам'яті та логічні умови, які з використанням промислової елементної бази перетворюються в структурну схему засобу для оцінки залишкового робочого ресурсу пристрою РПН. Очевидно, що для повноцінної реалізації пристрою необхідно в пристрій ввести сенсори, якими фіксується

сигнал про перемикання, що формується на виході автоматичного регулятора напруги. В результаті отримуємо структурну схему пристрою для оцінювання залишкового робочого ресурсу пристрою РПН, що наведена на рис. 2.

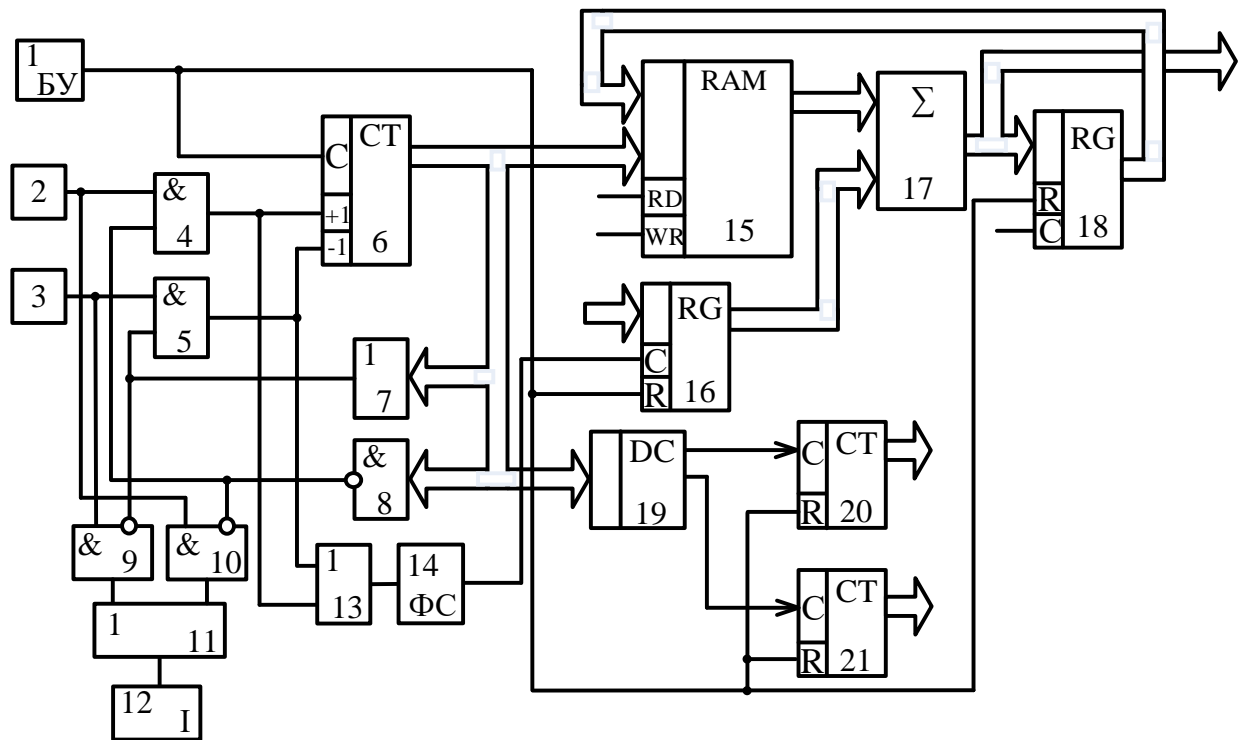


Рисунок 2 – Синтезована структурна схема пристрою для оцінювання залишкового робочого ресурсу пристрою РПН

Підкреслимо, що зазначена структура реалізована в укороченому варіанті відповідно до формування поставленої задачі синтезу структури пристрою.

На рис. 2 введено такі позначення: 1 – блок установки; 2, 3 – сенсори перемикання відгалужень «вверх» та «вниз» відповідно; 4, 5 – елементи І; 6 – реверсивний лічильник; 7 – елемент АБО; 8 – елемент І-НІ; 9, 10 – елементи І; 11, 13 – елементи АБО; 12 – індикатор; 14 – формувач сигналу; 15 – блок пам'яті; 16, 18 – регістри; 17 – суматор; 19 – дешифратор; 20, 21 – лічильники.

Робота пристрою пояснюється так. При подачі напруги живлення реверсивний лічильник 6 встановлює на виході цифровий код, що відповідає середньому відгалуженню пристрою РПН силового трансформатора. Одночасно регістри 16 і 18 та лічильник 20 і 21 встановлюють нульовий код. Зауважимо, що наведена структура призначена тільки для пояснення роботи пристрою для оцінювання робочого ресурсу пристрою РПН, а тому містить інформацію лише



про два відгалуження. Отже, в лічильниках 20 та 21 зберігається та накопичується інформація про кількість механічних перемикачів по кожному відгалуженню (в даному випадку по двох відгалуженнях). В блоці пам'яті 15, який виконує функцію декількох регістрів, кількість яких відповідає кількості відгалужень, накопичується інформація про вичерпаний комутаційний ресурс, який витрачається при перемикачній відгалужень пристроєм РПН з урахування значення струму, що комутується.

В момент появи сигналу на виході сенсора перемикачів «вверх» 2 реверсивний лічильник 6 нараджує цифровий код, внаслідок чого через дешифратор 19 в лічильнику 20 записується один імпульс як факт перемикачів першого відгалуження, а в блоці пам'яті 15 в першій комірці записується цифровий код, що відповідає комутуваному струму при першому перемикачній, що фіксується в регістрі 16, на вхід якого цифровий код подається з каналу вимірювання комутуваного струму (на схемі показано).

При черговій комутації цифровий код записується в лічильник 21 та в другу комірку блока пам'яті 15. Таким чином по кожному відгалуженню відбувається накопичення відпрацьованого механічного та комутаційного ресурсу пристрою РПН.

У разі, якщо пристрій РПН перебуває на крайньому відгалуженню (в даному випадку – другому) а з сенсора перемикачів відгалуження «вверх» 2 надходить сигнал на перемикачів, то на індикатор 12 через елемент І 10 та елемент АБО 11 поступає сигнал, що свідчить про несправність або пристрою РПН, або в каналі передавання керуючого сигналу від регулятора до пристрою РПН.

Аналогічним чином пристрій працює у випадку перемикачів відгалужень силового трансформатор «вниз».

Накопичення комутаційного ресурсу здійснюється по кожному відгалуженню за допомогою суматора 17 та регістра 18, які керуються розподільвачем тактів (на схемі не наведено).

Поєднання синтезованої структури пристрою з врахуванням конкретної реалізації пристрою РПН дозволяє відслідковувати процес вичерпання

комутаційного та механічного ресурсів останнього а, отже, підвищувати як надійність роботи силового трансформатор в цілому, так і рівень культури обслуговування електрообладнання.

### Висновки.

Обґрунтована необхідність створення пристрою для оцінювання робочого ресурсу пристрою РПН з врахуванням факту перемикання та вимірювання струму комутації в момент перемикання по кожному відгалуженню.

З використанням математичного апарату секвенцій синтезована структура пристрою для оцінки механічного та комутаційного ресурсів контактної системи пристрою РПН, придатна для практичного використання.

### БІБЛОГРАФІЧНИЙ 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. «European Smart Grids Technology Platform» // European Commission. Directorate-General for Research Sustainable Energy System, EUR 22040, 2006. 44 p.
3. Chakraborty A., Ilic M. *Control and Optimization Methods for Electric Smart Grids*. Springer, N.Y., 2012. 363 p.
4. «Трансформатори силові» Типова інструкція з експлуатації: СОУ 40.12167768107:2009 / М-во палива та енергетики України. Київ: ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, 2009. 111 с.
5. CIGRE Working Group A2.18 *Guide for Life Management Techniques for Power Transformers*. Paris: CIGRE, 2003. 128 p.
6. ГКД 34.46.401-96 «Трансформатори силові, пристрої перемикання відгалужень обмоток трансформаторів РПН під навантаженням типів PS, SDV, SCV, SAV» [Текст]: методичні вказівки з налагодження. Міністерство енергетики України. Київ : ДонОРГРЕС, 2003. 50 с.
7. Норми випробування електрообладнання (у редакції Наказу Мінекоенерго від 06.04.2020 № 224). СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. – [чинний від 06.04.2020]. Харків: Видавництво Індустрія, 2021. 232 с.
8. Грабко В. В., Бальзан І. В. *Електротехнічний комплекс регулювання напруги трансформатором з РПН*: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2016. 126 с.
9. Malik H., Tarkeshwar V., Jarial R. K. «An expert system for incipient fault diagnosis and condition assessment in transformer» IEEE international conference on computational intelligence and communication systems, 2011. pp. 138–142.
10. Добровська Л. М., Добровська І.А. *Теорія та практика нейронних мереж*: навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ» Вид-во «Політехніка», 2015. 396 с.
11. Harris, David Money and Sarah L. Harris. *Digital design and computer architecture*. 2nd ed. by Elsevier Inc, 2013. 690 p.
12. Benedikt Bollig, Fedor Ryabinin, and Arnaud Sangnier. «Reachability in Distributed Memory Automata» In 29th EACSL Annual Conference on Computer Science Logic (CSL 2021). Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs), Volume 183, 2021. pp. 13:1-13:16.
13. Розводюк М. П., Бомбик В. С. «Синтез структури пристрою для визначення залишкового ресурсу асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором» Вісник ВПІ, 2019. № 2. С. 52–60.

## 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. «European Smart Grids Technology Platform» // European Commission. Directorate-General for Research Sustainable Energy System, EUR 22040, 2006. 44 p.
3. Chakraborty A., Ilic M. *Control and Optimization Methods for Electric Smart Grids*. Springer, N.Y., 2012. 363 p.
4. «Power transformers». Standard operating instructions: SOU 40.12167768107:2009 / Ministry of Fuel and Energy of Ukraine. K. : GREFRE: Ministry of Fuel and Energy of Ukraine, 2009. 111 p.
5. CIGRE Working Group A2.18. *Guide for Life Management Techniques For Power Transformers*. Paris: CIGRE, 2003. 128 p.
6. IGD 34.46.401-96. «Power transformers, branch switching devices of tap-changer transformer windings under load types PS, SDV, SCV, SAV» [Text]: methodological guidelines for debugging. Ministry of Energy of Ukraine. K.: DonORGRES, 2003. 50 p.
7. Norms for testing electrical equipment (in the edition of the Order of the Ministry of Energy from 06.04.2020 № 224). SOU-N EE 20.302:2007. – [valid from 06.04.2020]. Kharkiv: Industry Publishing House, 2021. 232 p.
8. Grabko V. V., Balzan E.V. *Electrical complex of voltage regulation by transformer with tap-changer: monograph*. Vinnytsia: VNTU, 2016. 126 p.
9. Malik H., Tarkeshwar V., Jarial R. K. «An expert system for incipient fault diagnosis and condition assessment in transformer» IEEE international conference on computational intelligence and communication systems, 2011. pp. 138–142.
10. Dobrovska L. M., Dobrovska E.A. *Theory and practice of neural networks: training manual*. K. : NTUU «KPI» Vyd-vo «Politechnika», 2015. 396 p.
11. Harris, David Money and Sarah L. Harris. *Digital design and computer architecture*. 2nd ed. by Elsevier Inc, 2013. 690 p.
12. Benedikt Bollig, Fedor Ryabinin, and Arnaud Sangnier. «Reachability in Distributed Memory Automata» In 29th EACSL Annual Conference on Computer Science Logic (CSL 2021). Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs), Volume 183, 2021. pp. 13:1-13:16.
13. Rozvodjuk M. P., Bombyk V. S. «Synthesis of the structure of the device for determining the residual resource of an asynchronous motor with a short-circuited rotor» [«Syntez struktury prystroyu dlya vyznachennya zalyshkovogo resursu asynhronnogo dvyguna z korotkozamknеныm rotorom»]. Visnyk VPI, № 2, 2019. pp. 52–60.

Надійшла до редакції 18.01.2025 р.