

**СТРУКТУРА ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РЕСУРСУ  
СИЛОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА****М. П. Розводюк, В. С. Вдовиченко**

Вінницький національний технічний університет

Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна. E-mail: rozvodiukmp@gmail.com

**К. М. Розводюк**

Подільський науково-технічний лицей для обдарованої молоді

вул. Воїнів-Інтернаціоналістів, 9, м. Вінниця, 21021, Україна. E-mail: rozvodiukkm@gmail.com

Відсутність фінансування енергетичної галузі в необхідному обсязі призводить до необхідності здійснювати експлуатацію силових масляних трансформаторів не за терміном їх служби, який гарантований заводом-виробником, а за технічним станом. За таких умов важливим фактором є забезпечення надійності функціонування силових масляних трансформаторів. Реалізація такої умови можлива за рахунок визначення достовірного значення їхнього залишкового ресурсу. Розв'язання цієї задачі можливе з використанням засобів діагностування. Найбільш ефективними є саме ті, що дозволяють визначити залишковий ресурс силового масляного трансформатора в процесі його експлуатації. В роботі запропоновано визначити ресурс силового масляного трансформатора за такими показниками: температурою верхніх шарів масла в баку, струмом в колі вторинної обмотки, напругою, коефіцієнтом потужності, температурою навколишнього середовища, тиском масла в високовольтному вводі, концентрацією газів у маслі високовольтного вводу, швидкістю зростання концентрації газів у маслі високовольтного вводу, а також за технічним станом пристрою регулювання напруги під навантаженням. Розроблено граф функціонування блока обробки інформації структури пристрою, який характеризує стани переходу системи при різних режимах роботи трансформатора: в нормальному та режимах перевантаження за чотирма параметрами. Здійснено аналітичний опис функціонування графа за допомогою апарату секвенцій. Це дало можливість синтезувати структуру пристрою для визначення ресурсу силового масляного трансформатора, яка враховує всі зазначені вище показники, які впливають на зменшення цього ресурсу. Крім визначення ресурсу трансформатора, як в нормальному режимі роботи, так і в режимі перевантаження, пристрій має здатність контролювати допустимий тиск в маслі високовольтного вводу та визначити неодноразовість перемикання пристрою регулювання напруги під навантаженням при пофазному перемиканні відпайок. При перевищенні хоча б одного з показників трансформатора допустимого значення, подається сигнал в коло сигналізації та відображається інформація на відповідному індикаторі. Використання отриманих результатів дозволить підвищити надійність функціонування силових масляних трансформаторів.

**Ключові слова:** трансформатор, залишковий ресурс, апарат секвенцій, блок обробки інформації.

**СТРУКТУРА УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСА  
СИЛОВОГО МАСЛЯННОГО ТРАНСФОРМАТОРА****М. П. Розводюк, В. Е. Вдовиченко**

Винницкий национальный технический университет

Хмельницкое шоссе, 95, г. Винница, 21021, Украина. E-mail: rozvodiukmp@gmail.com

**К. М. Розводюк**

Подольский научно-технический лицей для одаренной молодежи

ул. Воинов-Интернационалистов, 9, г. Винница, 21021, Украина. E-mail: rozvodiukkm@gmail.com

Отсутствие финансирования энергетической отрасли в необходимом объеме приводит к необходимости осуществлять эксплуатацию силовых масляных трансформаторов не по сроку их службы, гарантированного заводом-изготовителем, а за техническим состоянием. При таких условиях важным фактором является обеспечение надежности функционирования силовых масляных трансформаторов. Реализация такого условия возможна за счет определения достоверного значения их остаточного ресурса. Решение этой задачи возможно с использованием средств диагностирования. Наиболее эффективными являются именно те, которые позволяют определять остаточный ресурс силового масляного трансформатора в процессе его эксплуатации. В работе предложено определять ресурс силового масляного трансформатора по следующим показателям: температуре верхних слоев масла в баке, токе в цепи вторичной обмотки, напряжению, коэффициенте мощности, температуре окружающей среды, давлении масла в высоковольтном вводе, концентрации газов в масле высоковольтного ввода, скорости увеличения концентрации газов в масле высоковольтного ввода, а также за техническим состоянием устройства регулирования напряжения под нагрузкой. Разработан граф функционирования блока обработки информации структуры устройства, характеризующий состояния перехода системы при различных режимах работы трансформатора: в нормальном и режимах перегрузки по четырем параметрам. Осуществлено аналитическое описание функционирования графа с помощью аппарата секвенций. Это позволило синтезировать структуру устройства для определения ресурса силового масляного трансформатора, которая учитывает все указанные выше показатели, которые влияют на уменьшение этого ресурса. Кроме определения ресурса трансформатора, как в нормальном режиме работы, так и в режиме

перегрузки, устройство имеет способность контролировать допустимое давление в масле высоковольтного ввода и определять неодновременности переключения устройства регулирования напряжения под нагрузкой при пофазном переключении отпаек. При превышении хотя бы одного из показателей трансформатора допустимого значения, подается сигнал в цепь сигнализации и отображается информация на соответствующем индикаторе. Использование полученных результатов позволит повысить надежность функционирования силовых масляных трансформаторов.

**Ключевые слова:** трансформатор, остаточный ресурс, аппарат секвенций, блок обработки информации.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Більшість силових масляних трансформаторів, які експлуатуються в Україні, вже давно відпрацювали свій ресурс, який гарантований заводом-виробником, або ж його залишок прямує до нуля. За умови недостатнього фінансування заміна такого трансформатора, вартість якого достатньо велика, на новий практично є неможливою.

Якщо подивитися з іншої сторони й аналізувати силові трансформатори з точки зору їхнього технічного стану, то виявляється, що більша їх частина має цей показник в задовільному стані. Іншими словами, ці трансформатори ще здатні виконувати свої функції не зважаючи на свій вік.

Виходячи з такого міркування, замінювати вартісні силові масляні трансформатори, які ще придатні для використання на виробництві, хоч і завод-виробник не гарантує їхньої надійності в подальшому було б не зовсім правильно. Особливо це актуально за умови браку коштів на такі операції. Тому домінуючим фактором умови експлуатації працюючих силових масляних трансформаторів виходить не їх термін служби, а їх технічний стан.

Однак при продовженні терміну служби силових масляних трансформаторів необхідною умовою є забезпечення надійного їх функціонування з метою унеможливити виникнення аварійних ситуацій або ж зменшити ймовірність їх появи до мінімуму.

Для забезпечення такої працездатності силових масляних трансформаторів ключовим фактором є визначення достовірного значення їхнього залишкового ресурсу. А тому тема роботи є актуальною.

Реалізація цієї задачі можлива з використанням засобів діагностування. Проте одні з них передбачають визначення технічного стану силового масляного трансформатора при його відключенні, а інші – не враховують ті чи інші параметри, що не дозволяє точно визначити залишковий ресурс трансформатора.

Виходячи з аналізу методів та засобів діагностування силових масляних трансформаторів [1–4], можна констатувати, що найбільш достовірними є ті, що забезпечують постійний моніторинг стану трансформатора в процесі його експлуатації.

В даному напрямку існує достатньо напрацьованих. Наприклад, пристрій для діагностування силового масляного трансформатора [5] має недостатню точність, оскільки при визначенні поточного значення активної потужності трансформатора не враховується коефіцієнт

потужності. В структурній схемі пристрою для діагностування трансформатора [1] не передбачено можливість визначення неодноразовості перемикання пристрою регулювання напруги під навантаженням (РПН) при пофазному перемиканні відпайок.

В роботах [6, 7] запропоновано здійснювати діагностування силових трансформаторів з використанням нечітких множин, проте пристрою для реалізації не приведено.

В роботах [8–10] акцентується увага на ідентифікацію технічного стану трансформатора лише за його обмотками та магнітопроводом.

Також наявні роботи [11–15], в яких приведені методи та підходи, використання яких дозволяє здійснювати ідентифікацію та прогнозування технічного стану трансформатора.

Підсумовуючи проаналізовані матеріали, можна стверджувати, що існуючі ті, чи інші методи й пристрої для визначення ресурсу силових масляних трансформаторів або ж містять узагальнену структуру, або ж навпаки, орієнтовані на конкретне застосування.

Тому метою роботи є підвищення надійності роботи силового масляного трансформатора шляхом синтезу структури пристрою для визначення його залишкового ресурсу з врахуванням найбільш інформативних параметрів, які впливають на його зміну, в процесі функціонування трансформатора.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Для визначення ресурсу силового масляного трансформатора пропонується використати параметри, які найбільш суттєво впливають на його зміну, або ж перевищення максимально допустимих значень яких призводить до аварійних ситуацій. До таких параметрів віднесемо: температуру верхніх шарів масла в баку, струм в колі вторинної обмотки, напругу, коефіцієнт потужності, температуру навколишнього середовища, тиск масла в високовольтному вводі, концентрацію газів у маслі високовольтного вводу, швидкість зростання концентрації газів у маслі високовольтного вводу, а також технічний стан пристрою регулювання напруги під навантаженням.

Основним елементом структури пристрою для визначення ресурсу силового масляного трансформатора є блок обробки інформації. Для його синтезу пропонується використання апарату секвенцій [16–19].

Для опису роботи блоку обробки інформації введемо позначення:

– Z – сигнал початкового стану блока обробки

інформації в момент подачі напруги живлення;  
 –  $S_1, \dots, S_{36}$  – стани переходу блоку обробки інформації (стани, в яких він може перебувати);  
 –  $N$  – сигнал, який відповідає спрацюванню ресурсу трансформатора під час нормального режиму його роботи;  
 –  $H$  – сигнал, який свідчить про виникнення режиму перевантаження в процесі роботи трансформатора;  
 –  $F_1, F_2, F_3, F_4$  – сигнали, які характеризують перевантаження трансформатора за першим, другим, третім та четвертим рівнями, відповідно. Зауважимо, що чим вищий рівень перевантаження трансформатора, тим більшою буде швидкість зменшення його ресурсу;  
 –  $Y$  – вихідний сигнал, який характеризує нульове значення ресурсу трансформатора.

В структуру блока обробки інформації введемо:

– тригер T1 – для реалізації генератора тактових імпульсів з часовими затримками  $\tau_1$  і  $\tau_3$ , яким моделюється режим перевантаження трансформатора за першим рівнем;  
 – тригер T2 – для реалізації генератора тактових імпульсів з часовими затримками  $\tau_1$  і  $\tau_4$ , яким моделюється режим перевантаження трансформатора за другим рівнем;  
 – тригер T3 – для реалізації генератора тактових імпульсів з часовими затримками  $\tau_1$  і  $\tau_5$ , яким моделюється режим перевантаження трансформатора за третім рівнем;  
 – тригер T4 – для реалізації генератора тактових імпульсів з часовими затримками  $\tau_1$  і  $\tau_6$ , яким моделюється режим перевантаження трансформатора за четвертим рівнем;  
 – тригер T5 – для реалізації генератора тактових імпульсів з часовими затримками  $\tau_1$  і  $\tau_2$ , яким моделюється режим спрацювання ресурсу ізоляції в нормальному режимі роботи;  
 – тригери T6, ..., T9 – для реалізації блоку підрахунку імпульсів, що надходять, з часовою затримкою  $\tau_6, \dots, \tau_9$  між змінами станів тригерів для підрахунку вказаних імпульсів.

Часова затримка  $\tau_1$  характеризує тривалість імпульсу, а часові затримки  $\tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5, \tau_6, \tau_7, \tau_8$  та  $\tau_9$  – тривалість паузи між імпульсами.

Тривалості пауз між імпульсами відповідають умові:

$$\tau_1 \ll \tau_6 < \tau_5 < \tau_4 < \tau_3 < \tau_2.$$

Відповідно до зроблених викладок, отримано граф функціонування блока обробки інформації, поданий на рисунку 1.

Аналітичний опис роботи блоку обробки інформації відповідно до графа функціонування можна представити системою секвенцій:

$$\begin{aligned} ZS_0 & \vdash S_0; \\ \overline{NF_1 F_2 F_3 F_4} S_0 & \vdash S_0; \\ \overline{NHS_0} & \vdash S_1; \\ HF_1 S_0 & \vdash S_9; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} HF_2 S_0 & \vdash S_{16}; \\ HF_3 S_0 & \vdash S_{23}; \\ HF_4 S_0 & \vdash S_{30}; \\ \tau_1 S_1 & \vdash S_2; \\ \overline{NH} \tau_2 S_2 & \vdash S_3; \\ \tau_1 S_3 & \vdash S_4; \\ \overline{NH} \tau_2 S_4 & \vdash S_5; \\ \tau_1 S_5 & \vdash S_6; \\ \overline{NH} \tau_2 S_6 & \vdash S_7; \\ \tau_1 S_7 & \vdash S_8; \\ \overline{NH} \tau_2 S_8 & \vdash S_7; \\ \tau_1 S_9 & \vdash S_{10}; \\ HF_1 \tau_3 S_{10} & \vdash S_{11}; \\ \tau_1 S_{11} & \vdash S_{12}; \\ HF_1 \tau_3 S_{12} & \vdash S_{13}; \\ \tau_1 S_{13} & \vdash S_{14}; \\ HF_1 \tau_3 S_{14} & \vdash S_{15}; \\ \tau_1 S_{15} & \vdash S_8; \\ HF_1 \tau_3 S_8 & \vdash S_{15}; \\ \tau_1 S_{16} & \vdash S_{17}; \\ HF_2 \tau_4 S_{17} & \vdash S_{18}; \\ \tau_1 S_{18} & \vdash S_{19}; \\ HF_2 \tau_4 S_{19} & \vdash S_{20}; \\ \tau_1 S_{20} & \vdash S_{21}; \\ HF_2 \tau_4 S_{21} & \vdash S_{22}; \\ \tau_1 S_{22} & \vdash S_8; \\ HF_2 \tau_4 S_8 & \vdash S_{22}; \\ \tau_1 S_{23} & \vdash S_{24}; \\ HF_3 \tau_5 S_{24} & \vdash S_{25}; \\ \tau_1 S_{25} & \vdash S_{26}; \\ HF_3 \tau_5 S_{26} & \vdash S_{27}; \\ \tau_1 S_{27} & \vdash S_{28}; \\ HF_3 \tau_5 S_{28} & \vdash S_{29}; \\ \tau_1 S_{29} & \vdash S_8; \\ HF_3 \tau_5 S_8 & \vdash S_{29}; \\ \tau_1 S_{30} & \vdash S_{31}; \\ HF_4 \tau_6 S_{31} & \vdash S_{32}; \\ \tau_1 S_{32} & \vdash S_{33}; \\ HF_4 \tau_6 S_{33} & \vdash S_{34}; \\ \tau_1 S_{34} & \vdash S_{35}; \\ HF_4 \tau_6 S_{35} & \vdash S_{36}; \\ \tau_1 S_{36} & \vdash S_8; \\ HF_4 \tau_6 S_8 & \vdash S_{36}; \\ HF_1 S_2 & \vdash S_{11}; \\ HF_2 S_2 & \vdash S_{18}; \\ HF_3 S_2 & \vdash S_{25}; \\ HF_4 S_2 & \vdash S_{32}; \\ HF_1 S_4 & \vdash S_{13}; \end{aligned}$$

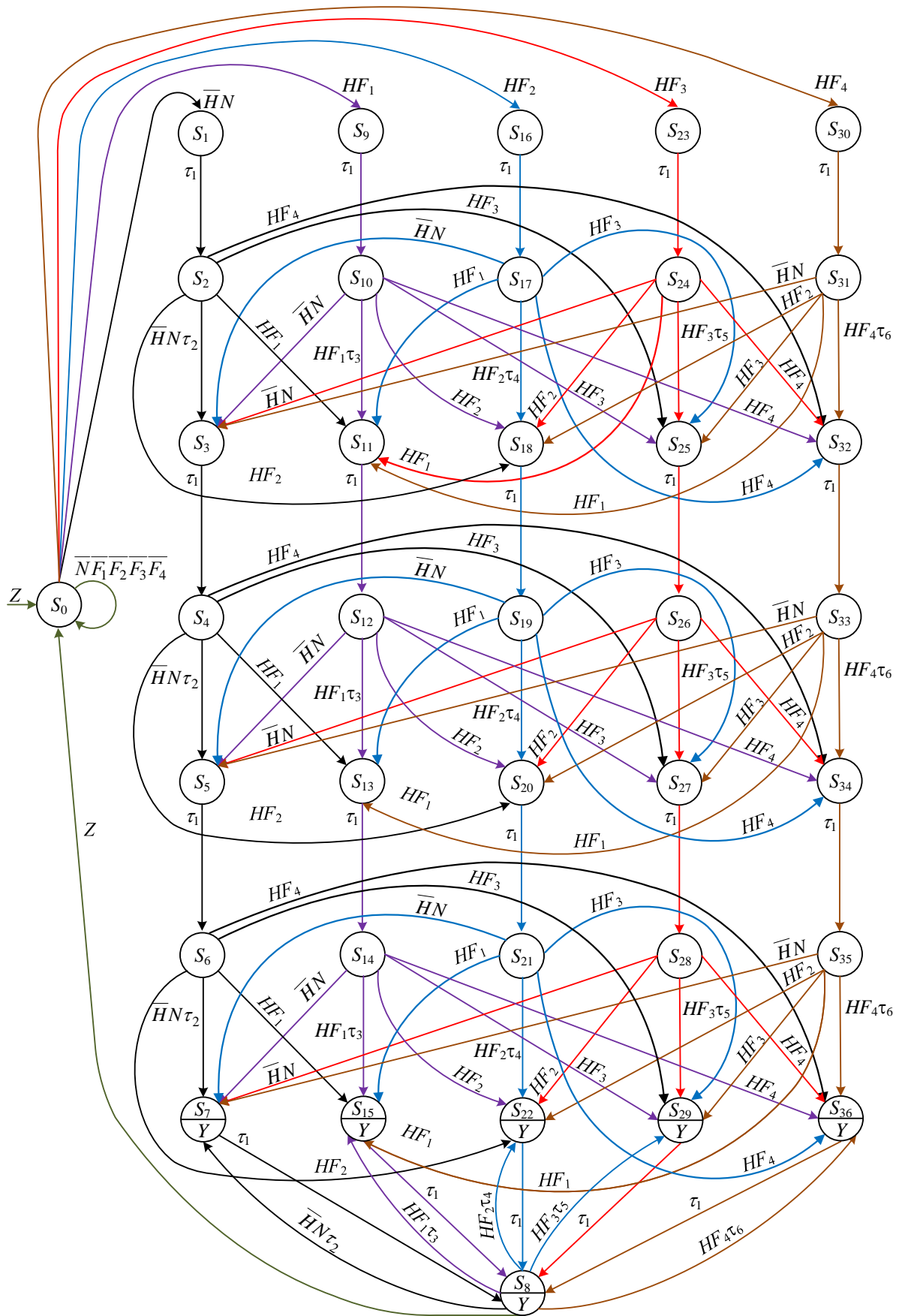


Рисунок 1 – Граф функціонування блоку обробки інформації пристрою для визначення ресурсу силового масляного трансформатора

$$\begin{aligned}
 HF_2S_4 & \vdash S_{20}; \\
 HF_3S_4 & \vdash S_{27}; \\
 HF_4S_4 & \vdash S_{34}; \\
 HF_1S_6 & \vdash S_{15}; \\
 HF_2S_6 & \vdash S_{22}; \\
 HF_3S_6 & \vdash S_{29}; \\
 HF_4S_6 & \vdash S_{36}; \\
 \overline{HNS}_{10} & \vdash S_3; \\
 HF_2S_{10} & \vdash S_{18}; \\
 HF_3S_{10} & \vdash S_{25}; \\
 HF_4S_{10} & \vdash S_{32}; \\
 \overline{HNS}_{12} & \vdash S_5; \\
 HF_2S_{12} & \vdash S_{20}; \\
 HF_3S_{12} & \vdash S_{27}; \\
 HF_4S_{12} & \vdash S_{34}; \\
 \overline{HNS}_{14} & \vdash S_7; \\
 HF_2S_{14} & \vdash S_{22}; \\
 HF_3S_{14} & \vdash S_{29}; \\
 HF_4S_{14} & \vdash S_{36}; \\
 \overline{HNS}_{17} & \vdash S_3; \\
 HF_1S_{17} & \vdash S_{11}; \\
 HF_3S_{17} & \vdash S_{25}; \\
 HF_4S_{17} & \vdash S_{32}; \\
 \overline{HNS}_{19} & \vdash S_5; \\
 HF_1S_{19} & \vdash S_{13}; \\
 HF_3S_{19} & \vdash S_{27}; \\
 HF_4S_{19} & \vdash S_{34}; \\
 \overline{HNS}_{21} & \vdash S_7; \\
 HF_1S_{21} & \vdash S_{15}; \\
 HF_3S_{21} & \vdash S_{29}; \\
 HF_4S_{21} & \vdash S_{36}; \\
 \overline{HNS}_{24} & \vdash S_3; \\
 HF_1S_{24} & \vdash S_{11}; \\
 HF_2S_{24} & \vdash S_{18}; \\
 HF_4S_{24} & \vdash S_{32}; \\
 \overline{HNS}_{26} & \vdash S_5; \\
 HF_1S_{26} & \vdash S_{13}; \\
 HF_2S_{26} & \vdash S_{20}; \\
 HF_4S_{26} & \vdash S_{34}; \\
 \overline{HNS}_{28} & \vdash S_7; \\
 HF_1S_{28} & \vdash S_{15}; \\
 HF_2S_{28} & \vdash S_{22}; \\
 HF_4S_{28} & \vdash S_{36}; \\
 \overline{HNS}_{31} & \vdash S_3; \\
 HF_1S_{31} & \vdash S_{11}; \\
 HF_2S_{31} & \vdash S_{18}; \\
 HF_3S_{31} & \vdash S_{25};
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 \overline{HNS}_{33} & \vdash S_5; \\
 HF_1S_{33} & \vdash S_{13}; \\
 HF_2S_{33} & \vdash S_{20}; \\
 HF_3S_{33} & \vdash S_{27}; \\
 \overline{HNS}_{35} & \vdash S_7; \\
 HF_1S_{35} & \vdash S_{15}; \\
 HF_2S_{35} & \vdash S_{22}; \\
 HF_3S_{35} & \vdash S_{29}; \\
 ZS_8 & \vdash S_0; \\
 S_7 \vee S_8 \vee S_{15} \vee S_{22} \vee S_{29} \vee S_{36} & \vdash Y.
 \end{aligned}$$

При цьому повинна виконуватися умова:

$$\begin{aligned}
 \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} & \in S_0; \\
 \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} T_5 \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} & \in S_1; \\
 \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} T_5 T_6 \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} & \in S_2; \\
 \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} T_5 T_6 T_7 \overline{T_8} \overline{T_9} & \in S_3; \\
 \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} T_5 T_6 T_7 T_8 \overline{T_9} & \in S_4; \\
 \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 & \in S_5; \\
 \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 & \in S_6; \\
 \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 & \in S_7; \\
 \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 & \in S_8; \\
 \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 & \in S_9; \\
 \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 & \in S_{10}; \\
 \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 & \in S_{11}; \\
 \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 & \in S_{12}; \\
 \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 & \in S_{13}; \\
 \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 & \in S_{14}; \\
 \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 & \in S_{15}; \\
 \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 & \in S_{16}; \\
 \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 & \in S_{17}; \\
 \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 & \in S_{18}; \\
 \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 & \in S_{19}; \\
 \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 & \in S_{20}; \\
 \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 & \in S_{21}; \\
 \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 & \in S_{22}; \\
 \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 & \in S_{23}; \\
 \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 & \in S_{24}; \\
 \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 & \in S_{25}; \\
 \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 & \in S_{26}; \\
 \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 & \in S_{27}; \\
 \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 & \in S_{28};
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} T_6 T_7 T_8 T_9 &\in S_{29}; \\ \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} T_4 \overline{T_5} T_6 \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} &\in S_{30}; \\ \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} T_6 \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} &\in S_{31}; \\ \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} T_4 \overline{T_5} T_6 T_7 \overline{T_8} \overline{T_9} &\in S_{32}; \\ \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} T_6 T_7 \overline{T_8} \overline{T_9} &\in S_{33}; \\ \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} T_4 \overline{T_5} T_6 T_7 T_8 \overline{T_9} &\in S_{34}; \\ \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} T_6 T_7 T_8 \overline{T_9} &\in S_{35}; \\ \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} T_4 \overline{T_5} T_6 T_7 T_8 T_9 &\in S_{36}. \end{aligned}$$

Після підстановки виразів (2) в (1) та здійснення перетворень і мінімізації секвенційних виразів відповідно до [16, 17], отримуємо:

$$\begin{aligned} F_1 \overline{T_1} \tau_3 &\vdash T_1; \\ T_1 \tau_1 &\vdash T_1; \\ F_2 \overline{T_2} \tau_4 &\vdash T_2; \\ T_2 \tau_4 &\vdash T_2; \\ F_3 \overline{T_3} \tau_5 &\vdash T_3; \\ T_3 \tau_5 &\vdash T_3; \\ F_4 \overline{T_4} \tau_6 &\vdash T_4; \\ T_4 \tau_6 &\vdash T_4; \\ N \overline{T_5} \tau_2 &\vdash T_5; \\ T_5 \tau_1 &\vdash T_5; \\ (T_1 \vee T_2 \vee T_3 \vee T_4) H \vee T_5 \overline{H} &\vdash T_6; \\ [(T_1 \vee T_2 \vee T_3 \vee T_4) H \vee T_5 \overline{H}] T_6 \tau_6 &\vdash T_7; \\ [(T_1 \vee T_2 \vee T_3 \vee T_4) H \vee T_5 \overline{H}] T_7 \tau_6 &\vdash T_8; \\ [(T_1 \vee T_2 \vee T_3 \vee T_4) H \vee T_5 \overline{H}] T_8 \tau_6 &\vdash T_9; \\ Z &\vdash \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9}; \\ T_6 T_7 T_8 T_9 &\vdash Y. \end{aligned} \quad (3)$$

Використовуючи мінімізовану систему секвенцій (3), здійснено синтез структурної схеми блоку обробки інформації, на основі чого здійснено повну реалізацію структури пристрою для визначення ресурсу силового масляного трансформатора. Для цього в структуру пристрою введено відповідні сенсори параметрів, що впливають на зменшення його ресурсу, а також необхідні блоки узгодження, обробки та передачі сигналів.

З врахуванням викладеного, отримано структуру пристрою для визначення ресурсу силового масляного трансформатора, подану на рисунку 2, на якому приведені такі позначення: 1, 23 – перший та другий датчики температури відповідно; 2 – датчик напруги; 3 – датчик струму; 4, 25 – перший та другий перетворювач температури в постійну напругу; 5, 6, 7, 27, 66, 69, 99 – перший, другий, третій, четвертий, п'ятий, шостий та сьомий нормуючі перетворювачі відповідно; 8, 13, 80 – перший, другий та третій аналого-цифрові перетворювачі відповідно; 9 – блок обчислення

потужності; 10, 22, 70 – перший, другий та третій перетворювачі змінної напруги в постійну відповідно; 11 – електронний ключ; 12 – блок задання потужності; 14, 32, 101 – другий, перший та третій компаратори відповідно; 15, 18, 24, 47, 92 – третій, перший, другий, четвертий та п'ятий генератори імпульсів відповідно; 16, 26, 35, 37, 48, 49, 50, 90 – другий, перший, третій, четвертий, п'ятий, шостий, сьомий та восьмий логічні елементи І відповідно; 17, 81, 84, 96 – перший, другий, третій та четвертий реєстри відповідно; 19, 29, 39, 52, 53, 54, 93 – перший, другий, третій четвертий, п'ятий, шостий та сьомий лічильники імпульсів відповідно; 20, 30, 72, 73, 74 – другий, перший, третій, четвертий та п'ятий функціональні перетворювачі відповідно; 21 – комутатор; 28, 67, 78 – перший, другий та третій суматори відповідно; 31 – цифро-аналоговий перетворювач; 33 – RS-тригер; 34 – формувач імпульсів; 36 – логічний елемент НІ; 38, 58, 59, 60, 61 – перший, третій, четвертий, п'ятий та другий логічні елементи АБО відповідно; 40 – логічний елемент АБО-НІ; 41, 42, 43 – перший, другий та третій датчики початку руху приводу пристрою РПН відповідно; 44, 45, 46 – перший, другий та третій логічні елементи ВИКЛЮЧНЕ АБО відповідно; 51, 85, 86 – перший, другий та третій блоки задання ресурсу відповідно; 55, 56, 57, 87, 88 – перший, другий, третій, четвертий та п'ятий цифрові компаратори відповідно; 62, 63, 64, 89, 91, 102 – перший, другий, третій, четвертий, п'ятий та шостий індикатори відповідно; 65 – датчик коефіцієнта потужності; 68, 75, 76, 77 – перший, другий, третій та четвертий масштабуючі підсилювачі відповідно; 71 – пристрій вибірки-зберігання; 79 – блок множення; 82, 83 – перший та другий цифрові суматори відповідно; 94 – дешифратор; 95 – блок установки нуля; 97 – датчик тиску; 98 – перетворювач тиску в постійну напругу; 100 – блок задання тиску.

Оцінка робочого ресурсу обмоток силового масляного трансформатора в нормальному режимі його функціонування здійснюється за даними датчика струму 3 та другого датчика температури 23. Ці датчики розподілені по об'єкту таким чином: датчик струму 3 встановлений в колі вторинної обмотки силового трансформатора, а другий датчик температури 23 встановлений в середині трансформатора та призначений для вимірювання температури верхніх шарів трансформаторного масла.

Спрацювання ресурсу ізоляції обмоток силового масляного трансформатора в режимі перевантаження здійснюється за даними першого датчика температури 1, датчика напруги 2, датчика струму 3 та датчика коефіцієнта потужності 65. Перший датчик температури 1 розташований поблизу силового масляного трансформатора та дозволяє контролювати температуру навколишнього середовища.

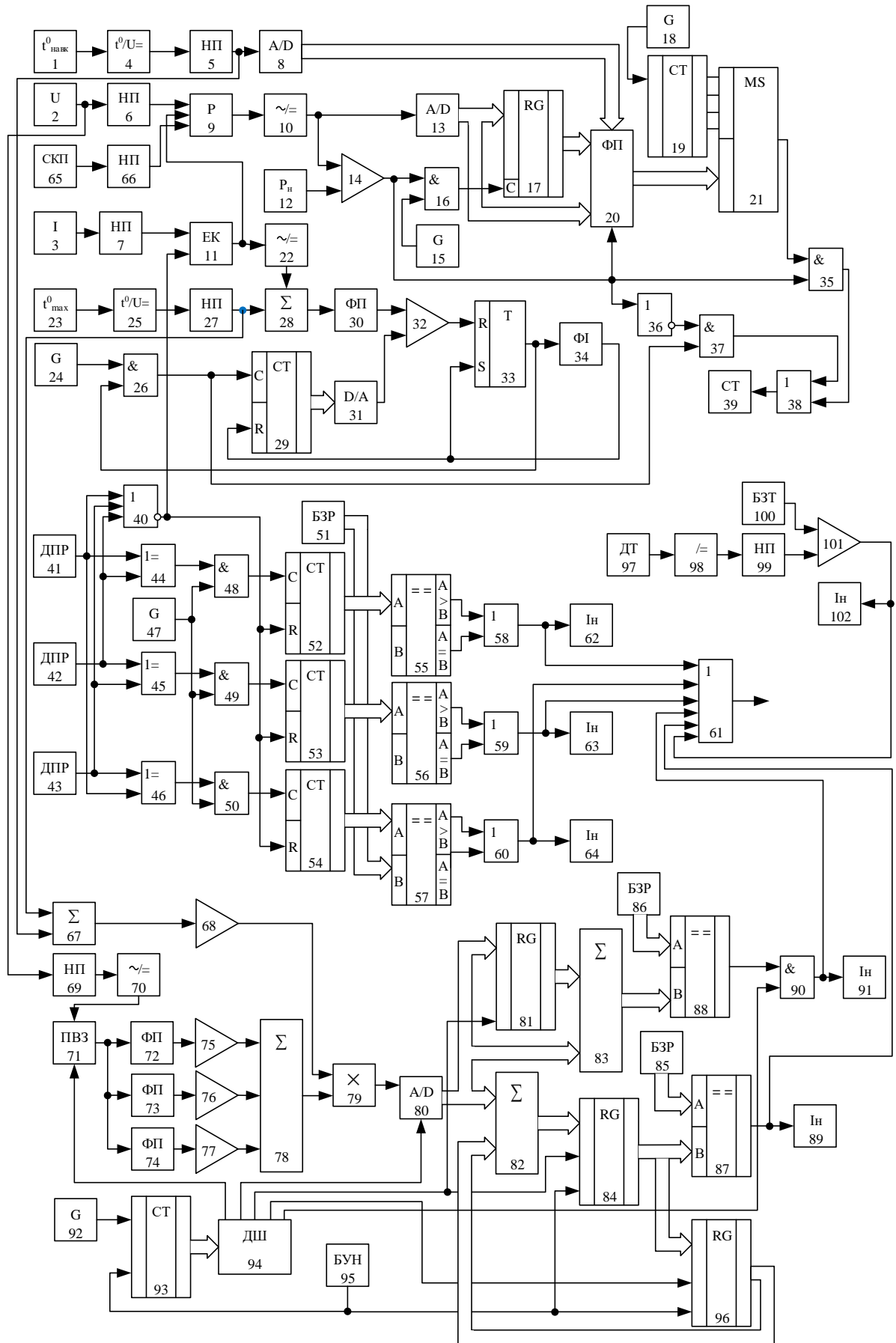


Рисунок 2 – Структура пристрою для визначення ресурсу силового масляного трансформатора

Датчик напруги 2 призначений для вимірювання значення напруги в електричній мережі трансформатора. Датчик коефіцієнта потужності 65 встановлений у вторинному колі трансформатора.

Контролювання тиску у маслі високовольтного вводу силового масляного трансформатора здійснюється за даними датчика тиску 97, який встановлений у високовольтному ввіді трансформатора.

Контролювання неодночасності перемикання пристрою РПН при пофазному перемиканні відпайок силового трансформатора здійснюється за даними першого 41, другого 42 та третього 43 датчиків початку руху приводу пристрою РПН. Перший датчик початку руху 41 установлений на валу привода перемикання відпайок фази А пристрою РПН, другий датчик початку руху 42 встановлений на валу привода перемикання відпайок фази В, а третій датчик початку руху 43 встановлений на валу привода перемикання відпайок фази С.

В третьому лічильнику імпульсів 39 введено у вигляді двійкового коду загальний робочий ресурс ізоляції обмоток трансформатора, витрачання якого здійснюється при надходженні на вхід лічильника різних послідовностей імпульсів в нормальному режимі роботи трансформатора та в режимі його перевантаження.

У блоці задання потужності 12 записане найбільш можливе значення потужності нормального режиму роботи силового трансформатора.

У першому блоці задання ресурсу 51 записаний цифровий код, що відповідає значенню ресурсу пристрою РПН, у другому блоці задання ресурсу 85 – цифровий код, що відповідає, граничному значенню концентрації газів  $C_{z,max}$  у маслі високовольтного вводу, за яким визначається повний відпрацьований робочий ресурс високовольтного вводу трансформатора, а у третьому блоці задання ресурсу 86 – цифровий код, що відповідає, граничному значенню швидкості зміни концентрації газів  $\left(\frac{dC_z(t)}{dt}\right)_{max}$  у маслі

високовольтного вводу.

У блоці задання тиску 100 записане максимально допустиме значення тиску в маслі трансформаторного вводу.

Старіння ізоляції обмоток трансформатора можна описати рівнянням Монтзінгера [1, 20]:

$$L = L_0 e^{\alpha\theta} = L_0 e^{\alpha(\theta_m + \theta_0)}, \quad (4)$$

де  $L$  – тривалість «життя» ізоляції;  $L_0$  – термін служби ізоляції, який відповідає нормованій температурі, – нормативний термін служби обмоток силового трансформатора;  $\alpha$  – коефіцієнт, що враховує зміну терміну служби ізоляції при зміні температури  $\theta$  найбільш нагрітої точки ізоляції обмоток;  $\theta_m$  – перевищення температури найбільш нагрітої точки ізоляції, викликане зміною струмів

навантаження;  $\theta_0$  – температура ізоляції обмоток.

З урахуванням можливості нехтуванням сталої часу перевищення температури  $\theta_m$  найбільш нагрітої точки ізоляції обмотки можна представити у вигляді [1, 20]:

$$\theta_m = \beta' \tau_n k^n, \quad (5)$$

де  $\beta'$  – коефіцієнт, що враховує різницю температур між середньою та найбільш нагрітою точками обмоток;  $\tau_n$  – усталений середній перегрів обмотки над її температурою в номінальному режимі;  $k^n$  – кратність струму навантаження трансформатора;  $n$  – коефіцієнт, який залежить від системи охолодження трансформатора.

Миттєве старіння ізоляції трансформатора, відповідно до (4), визначається експоненціальною функцією зі степенем, який дорівнює  $(\theta_m + \theta_0)$ .

Відповідно до цього, сумарне значення спрацьовування обмоток силового трансформатора за станом ізоляції, який працює як в нормальному режимі, так і в режимі перевантаження, за деякий проміжок часу  $t$  визначається за формулою [1]:

$$R = m \int_0^t e^{\alpha(\theta_m + \theta_0)} dt + R_n, \quad (6)$$

де  $m$  – масштабний коефіцієнт;  $R_n$  – ресурс, що спрацьовується в режимі перевантаження трансформатора.

При вимірюванні робочого ресурсу ізоляції обмоток силового масляного трансформатора в нормальному режимі його функціонування сигнали з другого датчика температури 23 та датчика струму 3 через відповідні елементи перетворення надходять до першого суматора 28. На його виході формується сигнал, пропорційний  $(\theta_m + \theta_0)$ . Перший функціональний перетворювач 30 перетворює цей сигнал за експоненціальним законом  $e^{\alpha(\theta_m + \theta_0)}$ . Після подальших перетворень сигнали подається до третього лічильника імпульсів 39 та фіксуються в ньому як ресурс роботи ізоляції обмоток трансформатора за період, починаючи з часу  $t_1$  коли відкривається перший логічний елемент І 26, та до часу  $t_2$ , коли перший логічний елемент І 26 закривається, у вигляді інтегралу  $m \int_0^t e^{\alpha(\theta_m + \theta_0)} dt$ .

Обчислюючи суму інтегралів у вигляді суми імпульсів, які надходять в третій лічильник імпульсів 39 в кожному циклі роботи блоків пристрою, можна визначити спрацьований в нормальному режимі роботи ресурс ізоляції обмоток трансформатора.

В режимі перевантаження силового масляного трансформатора з виходів датчика напруги 2, датчика струму 3 та датчика коефіцієнта потужності 65 сигнали, що відповідають значенням напруги трансформатора, струму, що протікає через трансформатор, коефіцієнту потужності відповідно надходять через відповідні перетворювачі сигналів до блоку обчислення потужності 9, у якому



визначається поточне значення активної потужності трансформатора.

У другому компараторі 14 здійснюється порівняння значення обчисленої поточної потужності трансформатора та найбільшого значення потужності нормального режиму його роботи. У разі перевищення потужністю граничного значення, в першому регістрі 17 залишається записаним значення потужності нормального режиму роботи трансформатора, а в третій лічильник імпульсів 39 спрямовується послідовність імпульсів, що характеризує спрацювання робочого ресурсу силового трансформатора в режимі перевантаження.

На виході другого функціонального перетворювача 20, на вхід якого надходить цифровий сигнал, пропорційний температурі навколишнього середовища, виміряної першим датчиком температури 1, код, пропорційний значенню потужності роботи трансформатора в нормальному режимі, та код, що відповідає значенню потужності трансформатора в режимі перевантаження, формуються в цифровій формі поточне значення залишкового робочого ресурсу ізоляції обмоток силового трансформатора. Після деяких операцій через відповідні сигнали сигнал подається на третій лічильник імпульсів 39, фіксуючи в ньому використання робочого ресурсу ізоляції обмоток силового трансформатора при поточному перевантаженні.

При завершенні режиму перевантаження силового масляного трансформатора на виході другого компаратора 14 з'являється сигнал логічного нуля і пристрій переходить в режим відслідковування спрацювання ресурсу ізоляції обмоток в нормальному режимі роботи трансформатора.

Датчики початку руху 41, 42 та 43 реєструють момент пофазного перемикання пристрою РПН. Під час спрацювання датчиків початку руху 41, 42 та 43 сигнал надходить у логічний елемент АБО-НІ 40, вихідний сигнал якщо розмикає електронний ключ 11, вмикаючи канал діагностування трансформатора в режимі перевантаження.

Припустимо, що у фазі А почалось перемикання раніше, ніж у фазах В та С. Тоді на виході першого датчика початку руху 41 сигнал з'являється раніше, ніж на датчиках 42 та 43. Відповідно сигнал з датчика 41 подається на перший 44 та третій 46 логічні елементи ВИКЛЮЧНЕ АБО, вихідні сигнали з яких дають можливість проходження імпульсів з четвертого генератора імпульсів 47 через п'ятий 48 та сьомий 50 логічні елементи І до четвертого 52 та шостого 54 лічильників імпульсів відповідно, вихідні цифрові коди яких порівнюються у першому 55 та третьому 57 цифрових компараторах із цифровим кодом, який надходить із блоку задання ресурсу 51. Якщо цифровий код, який записаний у лічильник імпульсів, менший цифрового коду, який записаний

у блоці задання ресурсу 51, то пристрій РПН працює у допустимому режимі роботи. В іншому випадку на виходах першого 55 та третього 57 цифрових компараторів з'являються сигнали, які через третій 58 та п'ятий 60 логічні елементи АБО відповідно надходять на перший 62 та третій 64 індикатори та на другий логічний елемент АБО 61, з якого сигнал надходить у кола сигналізації оперативного персоналу.

Аналогічно пристрій працює, якщо перемикання починається раніше у фазах В чи С.

Після закінчення переключення електронний ключ 11 замикається, режим діагностування обмоток трансформатора відновлюється, четвертий 52, п'ятий 53 та шостий 54 лічильники імпульсів обнуляються й пристрій переходить в режим очікування перемикання пристроєм РПН відпайок фаз силового масляного трансформатора.

Слід зазначити, що при спрацюванні пристрою, коли має місце несинхронне перемикання відпайок пристрою РПН, вмикаються одночасно два індикатори.

Якщо вмикається перший індикатор 62 (даний індикатор символізує про присутність несинхронного режиму під час перемикання між фазами А та В) та третій індикатор 64 (даний індикатор символізує про присутність несинхронного режиму під час перемикання між фазами А та С), відповідно робиться висновок про ненормальну роботу пристрою РПН у фазі А.

Якщо вмикається перший індикатор 62 та другий індикатор 63 (даний індикатор символізує про присутність несинхронного режиму під час перемикання між фазами В та С), відповідно робиться висновок про ненормальну роботу пристрою РПН у фазі В.

Якщо вмикається другий індикатор 63 та третій індикатор 64, відповідно робиться висновок про ненормальну роботу пристрою РПН у фазі С.

Зростання концентрації газу  $\Delta C_z$  в маслі високовольтного вводу трансформатора в часі  $\Delta t$  відбувається за рахунок старіння ізоляції при тривалому впливі початкових часткових розрядів внаслідок повільного розкладання масла та накопичення в ньому побічних продуктів. В такому випадку зростання концентрації газу  $\Delta C_z$  в маслі можна визначити як [20]:

$$\Delta C_z = \frac{\gamma}{V_0} P_n(t) \Delta t, \quad (6)$$

де  $\gamma$  – питома газовиділення;  $V_0$  – повний об'єм масла у високовольтному вводі;  $P_n(t)$  – середня потужність початкових часткових розрядів в момент часу  $t$ .

До моменту часу  $t$  концентрація газів, що виділяються з масла у високовольтному вводі, може бути визначена шляхом інтегрування виразу (6) [20]:

$$C_z(t) = \int_0^t \frac{\gamma}{V_0} P_n(t) dt. \quad (7)$$

Враховавши, що середня потужність  $P_n(t)$

часткових розрядів залежить від фазної напруги, прикладеної до ізоляції вводу, після перетворень отримаємо [20]:

$$C_z(t) = \int_0^t \left( \frac{2}{2 + \alpha_m \times \left( \begin{matrix} T_{вшм} + \\ + T_{навок} - 2T_n \end{matrix} \right)} \sum_{i=1}^3 \frac{\gamma A_i}{V_{\Sigma n}} U^{\beta_i}(t) \right) dt, \quad (8)$$

де  $\alpha_m$  – температурний коефіцієнт об’ємного розширення масла;  $T_{вшм}$  – температура верхніх шарів масла силового трансформатора;  $T_{навок}$  – температура навколишнього середовища;  $T_n$  – температура масла у вводі в номінальному режимі роботи;  $A_i, \beta_i$  – коефіцієнти апроксимації ( $i = \overline{1,3}$ );  $V_{\Sigma n}$  – повний об’єм масла у вводі при номінальному режимі роботи трансформатора;  $U$  – напруга.

Визначивши значення концентрації  $C_z(t)$  розчинених в маслі газів та швидкість її зростання  $dC_z(t)/dt$ , визначатимемо термін роботи високовольтного вводу силового масляного трансформатора. За умови, коли хоча б один із зазначених параметрів перевищує гранично

допустиме значення  $C_{z,max}$  чи  $\left( \frac{dC_z(t)}{dt} \right)_{max}$ , високовольтний ввід трансформатора потрібно замінювати.

Контролювання тиску в маслі трансформаторного вводу потрібно тому, що при суттєвих виділеннях газу в високовольтному вводі він зростає.

Вимірювання ресурсу високовольтного вводу силового масляного трансформатора відбувається у такій послідовності.

На виході другого суматора 67, на який через відповідні блоки подаються сигнали, пропорційні  $T_{навок}$  з першого датчика температури 1, та температурі верхніх шарів масла силового трансформатора  $T_{вшм}$  з другого датчика температури 23, формується сигнал  $T_{навок} + T_{вшм}$ , який подається на вхід першого масштабуючого підсилювача 68. На його виході формується сигнал

$\frac{2}{2 + \alpha_m \times (T_{вшм} + T_{навок} - 2T_n)}$ , який подається на перший вхід блоку множення 79.

Напруга, що вимірюється датчиком напруги 2, через відповідні блоки подається на вхід пристрою вибірки-зберігання 71, де запам’ятовується та подається на входи третього 72, четвертого 73 та п’ятого 74 функціональних перетворювачів, в яких відбувається обчислення значень  $U^{\beta_i}(t)$ . Результати розрахунків далі надходять на відповідні входи другого 75, третього 76 та четвертого 77 масштабуючих підсилювачів, в яких відбувається множення вихідних сигналів на відповідні

коефіцієнти  $\frac{\gamma A_i}{V_{\Sigma n}}$  та передача отриманих сигналів на

відповідні входи третього суматора 78. На його виході формується сигнал, пропорційний  $\sum_{i=1}^3 \frac{\gamma A_i}{V_{\Sigma n}} U^{\beta_i}(t)$ , який далі подається на другий вхід

блоку множення 79, на виході якого формується миттєве значення концентрації розчинених в маслі газів високовольтного вводу.

Перетворений в цифровий код сигнал третім аналого-цифровим перетворювачем 80 по цифровій шині надходить до першого входу першого цифрового суматора 82 та до цифрового входу другого регістра 81.

В початковий момент часу на виході першого цифрового суматора 82 буде цифровий сигнал, рівний вхідному, оскільки третій 84 та четвертий 96 регістри обнулені. При появі імпульсу на третьому виході дешифратора 94 записується в третій регістр 84, який є регістром робочого ресурсу високовольтного вводу трансформатора, а далі – записується в четвертий регістр 96 за умови появи імпульсу на четвертому виході дешифратора 94.

В першому циклі роботи пристрою ( $t_1 = 0$ ) за період  $[t_1, t_2]$  визначається робочий ресурс високовольтного вводу трансформатора згідно виразу

$$\int_0^t \left( \frac{2}{2 + \alpha_m (T_{вшм} + T_{навок} - 2T_n)} \sum_{i=1}^3 \frac{\gamma A_i}{V_{\Sigma n}} U^{\beta_i}(t) \right) dt.$$

В другому та наступних циклах роботи блоків пристрою в першому цифровому суматорі 82 відбувається сумування поточного значення відпрацьованого робочого ресурсу високовольтного вводу з сумарним відпрацьованим ресурсом, обчисленим у всіх попередніх циклах та записаним в четвертому регістрі 96.

Четвертим цифровим компаратором 87 здійснюється порівняння цифрових кодів з третього регістра 84 та з другого блоку задання ресурсу 85. За умови їх рівності, що відповідає вичерпанню робочого ресурсу високовольтного вводу, то включається четвертий індикатор 89 і через другий логічний елемент АБО 61 попереджувальний сигнал поступає в коло сигналізації.

В наступному етапі в пристрої вибірки-зберігання 71 записується нове значення фазної напруги електричної мережі, що подається з виходу датчика напруги 2. При подальших перетвореннях на виході блоку множення 79 формується нове миттєве значення концентрації розчинених в маслі газів високовольтного вводу, яке у цифровому коді подається на вхід другого цифрового суматора 83. На його виході формується цифровий код операції різниці вхідних цифрових кодів, які надходять від другого регістра 81 та третього аналого-цифрового перетворювача 80, тобто сигнал різниці миттєвих значень концентрації розчинених в маслі газів, що характеризує швидкість її зміни.

У п'ятому цифровому компараторі 88 порівнюється поточний код з кодом третього блоку задання ресурсу 86, що відповідає значенню

$$\left( \frac{dC_e(t)}{dt} \right)_{\max}$$

У випадку його перевищення, включається п'ятий індикатор 91 і через другий логічний елемент АБО 61 сповіщається оперативний персонал про перевищення граничної швидкості зростання концентрації розчинених в маслі газів.

У третьому компараторі 101 порівнюється поточне значення тиску в маслі високовольтного вводу, яке вимірюється датчиком тиску 97, зі значенням з блоку задання тиску 100. У випадку перевищення тиску в маслі високовольтного вводу допустимого рівня, включається шостий індикатор 102 та через другий логічний елемент АБО 61 подається сигнал в коло сигналізації.

**ВИСНОВКИ.** Синтезовано структуру пристрою для визначення ресурсу силового масляного трансформатора в процесі його функціонування, яка враховує такі параметри: температуру верхніх шарів масла в баку, струм в колі вторинної обмотки, напругу, коефіцієнт потужності, температуру навколишнього середовища, тиск масла в високовольтному вводі, концентрацію газів у маслі високовольтного вводу, швидкість зростання концентрації газів у маслі високовольтного вводу, а також технічний стан пристрою регулювання напруги під навантаженням. Ресурс роботи силового масляного трансформатора відслідковується як в нормальному режимі його функціонування, так і в режимі перевантаження. Крім того, передбачений контроль рівня тиску в маслі високовольтного вводу трансформатора.

При перевищенні хоча б одного з показників трансформатора допустимого значення, подається сигнал в коло сигналізації та відображається інформація на відповідному індикаторі. Використання отриманих результатів дозволить підвищити надійність функціонування силових масляних трансформаторів.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Пристрій для діагностування силового масляного трансформатора : пат. 65179 UA Україна : МПК G01R 31/06 (2006.01). № u201106402 ; заявл. 23.05.2011 ; опубл. 25.11.2011, Бюл. № 22. 8 с.
2. Гун І. Г., Салганик В. М., Евдокимов С. А., Сарлыбаев А. А. Основные неисправности и методы диагностирования силовых трансформаторов в условия эксплуатации. *Вестник МГТУ им. Г. И. Носова*. Магнитогорск. 2012. № 1. С. 102–105. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-neispravnosti-i-metody-diagnostirovaniya-silovyh-transformatorov-v-usloviyah-ekspluatatsii.pdf>
3. Христинич Р. М., Христинич А. Р., Христинич Е. В. Комплексная диагностика маслонеполненных трансформаторов. *Вестник КрасГАУ*. Красноярск. 2007. № 3. С. 222–227. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/kompleksnaya-diagnostika-maslonapolnennyh-transformatorov>

*diagnostika-maslonapolnennyh-transformatorov*

4. Полях О. М. Аналіз систем діагностування тягових трансформаторів. *Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2013. № 6 (112). С. 39–45.
5. Грабко В. В., Березницький Д. О. Діагностування трансформаторів власних потреб та систем технологічних захистів енергоблока теплової електростанції : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2010. 124 с.
6. Лежнюк П. Д., Рубаненко О. Є., Жук І. А. Діагностування силових трансформаторів з використанням нечітких множин. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вінниця, 2005. № 1. С. 43–51.
7. Розводюк М. П., Овчарук В. В., Вдовиченко В. Є., Овчар І. М. Визначення залишкового ресурсу силового масляного трансформатора на базі нечіткої логіки. *Monografia. Pokonferencyjna. Science, research, development #16. Technics and technology. Barcelona 29.04.2019 – 30.04.2019. Zbiór artykułów naukowych enzowanych. Zbiór artykułów naukowych z Konferencji Międzynarodowej Naukowo-Praktycznej (on-line) zorganizowanej dla pracowników naukowych uczelni, jednostek naukowo-badawczych oraz badawczych z państw obszaru byłego Związku Radzieckiego oraz byłej Jugosławii. (30.04.2019)*. Warszawa, 2019. 84 str. S. 71–77.
8. Рубаненко О. Є., Лабзун М. П., Гришук М. О. Визначення дефектів трансформаторного обладнання з використанням частотних діагностичних параметрів. *Вісник НТУ «ХП»*. Харків. 2017. № 23 (1245). С. 41–46. URL: [http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/31931/1/vestnik\\_KhPI\\_2017\\_23\\_Rubanenko\\_Vyznachennia.pdf](http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/31931/1/vestnik_KhPI_2017_23_Rubanenko_Vyznachennia.pdf)
9. Tenbohlen S., Vahidi F., Müller P., Gebauer J., Krüger M. Zuverlässigkeitsbewertung von Leistungstransformatoren (em inglês). *Proc. Stuttgarter Hochspannungssymposium*, 2012. P. 61–70.
10. Rahimpour E., Jabbari M., Tenbohlen S., Mathematical comparison methods to assess transfer functions of transformers to detect different types of mechanical faults. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2010. Vol. 25. № 4. P. 2544–2555.
11. Костерев Н. В., Бардик Е. И., Вожаков Р. В., Курач Т. Ю. Нечеткие алгоритмы оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса электрооборудования. *Наукові праці ДонНТУ. Електротехніка і енергетика*. Донецьк. 2008. Вип. 8 (140). С. 65–70.
12. Ясинський Ю. О., Немчинов А. О., Нікішин О. М. Прогнозування технічного стану ізоляції електрообладнання з урахуванням якості споживаємої електроенергії. *Системи обробки інформації*. Харків. 2010. Вип. 9 (90). С. 130–133.
13. Баширов М. Г., Прахов И. В., Богданов Д. И., Буланкин Е. И., Молчанов Н. А. Современные методы оценки технического состояния и прогнозирования ресурса высоковольтного

трансформатора. *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. Москва. 2016. № 4. С. 63–66.

14. Hui Song, Jiejie Dai, Lingen Luo, Gehao Sheng, Xiuchen Jiang. Power Transformer Operating State Prediction Method Based on an LSTM Network. *Energies*. 2018. 11 (4). 914. URL: <https://doi.org/10.3390/en11040914>

15. Osama E. Gouda, Adel Z. El Dein. Prediction of Aged Transformer Oil and Paper Insulation. *Electric Power Components and Systems*. 2019. Vol. 47. P. 406–419. URL: <https://doi.org/10.1080/15325008.2019.1604848>

16. Захаров В. Н. Автоматы с распределенной памятью. Москва : Энергия, 1975. 136 с.

17. Захаров Н. Г., Рогов В. Н. Синтез цифровых автоматов : учебное пособие. Ульяновск : УЛГТУ, 2003. 135 с.

18. Розвodiюк М. П., Бомбик В.С. Синтез структури пристрою для визначення залишкового ресурсу асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вінниця. 2019. № 2 (143). С. 52–60.

19. Овсяк В., Овсяк Ю. Теорія секвенційних алгоритмів як засіб побудови математичного, лінгвістичного, алгоритмічного та інформаційного забезпечення САПР. URL: [http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/35686/1/9\\_32-41.pdf](http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/35686/1/9_32-41.pdf)

20. Пристрій для вимірювання спрацювання силових трансформаторів : пат. 34253 Україна : МПК G01R 31/06. №99063415 ; заявл. 18.06.1999 ; опубл. 15.02.2001, Бюл. № 1. 9 с.

## STRUCTURE OF THE DEVICE FOR IDENTIFYING POWER OIL TRANSFORMER RESOURCES

**M. Rozvodiuk, V. Vdovichenko**

Vinnitsia National Technical University

Khmelnyske shose, 95, Vinnitsia, 21021, Ukraine. E-mail: rozvodiukmp@gmail.com

**K. Rozvodiuk**

Podillya scientific and technical Lyceum for gifted youth

vul. Voiniv-Internazionalistiv, 9, Vinnitsia, 21021, Ukraine. E-mail: rozvodiukkm@gmail.com

**Purpose.** Structure of the device for identifying power oil transformer resources is designed to improve the transformer operation reliability due to the identification of its technical state by identification of its residual resource and controlling its indicators during its operation. **Methodology.** Diagnostic methods aimed at resource identification of power oil transformer as well as a theory of sequential apparatuses for the device structure synthesis, which realizes the chosen diagnostic methods had been used during the research. **Results.** The paper suggests to identify the resources of power oil transformer using the following indicators: temperature of the oil upper layer in the tank, current in the secondary winding, voltage, power factor, temperature of the environment, oil pressure in high-voltage input, gasses concentration in high-voltage oil input, rate at which the gasses concentration in high-voltage input oil increase, as well as controlling over the technical state of the device for voltage regulation under load. There had been developed the functioning graph of the information processing block of the device structure, which characterizes the states of system's transfer in both, normal mode of operation and overloaded. The description of graph functioning is done using the apparatus of sequences. There had been synthesized the structure of the device for the identification of power oil transformer resources, which takes into account the above indicators. The device also controls the allowed oil pressure in the high-voltage input and determine the non-simultaneous switching in the device for under load voltage regulation during the single-phase switching of the branch lines. **Originality.** There had been improved the operation accuracy of the device for identifying power oil transformer resources due to its structure synthesis, which, unlike the existing ones, considers temperature of the upper oil layers in the tank, current in the secondary winding, voltage, power factor, temperature of the environment, oil pressure in high-voltage input, gasses concentration in high-voltage oil input, rate at which the gasses concentration in high-voltage input oil increase, as well as controlling over the technical state of the device for voltage regulation under load. **Practical value.** Using the structure of the device allows to improve the operation reliability of the oil transformer, decrease the probability of operating emergency conditions, and to improve operation reliability of the electric line which includes this device. References 20, figures 2.

**Key words:** transformer, residual resource, sequential apparatuses, block for information processing.

## REFERENCES

1. Grabko, V. V., Grabko, V. V., & Bal'zan, I. V. (2011). *Prystrij dlja diagnostuvannya sylovogo masljanogo transformatora [Device for diagnosing the power oil transformer]*. Patent UA, no. 65179. Bull. 22. [in Ukrainian]

2. Gun, I. G., Salganik, V. M., Evdokimov, S. A., & Sarlybaev, A. A. (2012). Osnovnye neispravnosti i metody diagnostirovaniya silovykh transformatorov v usloviya ekspluatatsii. *Vestnik MGTU im. G. I. Nosova. Magnitogorsk*, 1, 102-105. <https://cyberleninka.ru/>

article/n/osnovnye-neispravnosti-i-metody-diagnostirovaniya-silovykh-transformatorov-v-usloviyah-ekspluatatsii.pdf

3. Khristinich, R. M., Khristinich, A. R., & Khristinich, E. V. (2007). Kompleksnaya diagnostika maslonapolnennykh transformatorov. *Vestnik KrasGAU. Krasnoyarsk*, 3, 222–227. URL:

4. Polyakh, O. M. (2013). Analiz sistem diagnostuvannya tyagovikh transformatoriv. *Energoberezhnie. Energetika. Energoaudit*,

6 (112), 39–45. [in Russian]

5. Grabko, V. V., & Bereznitskiy, D. O. (2010). Diagnostuvannya transformatoriv vlasnikh potreb ta sistem tekhnologichnikh zakhistiv energobloka teplovoi elektrostantsii: monografiya [Diagnosis of transformers of own needs and systems of technological protection of power unit of thermal power plant: monograph]. Vinnytsia: VNTU. [in Ukrainian]

6. Lezhnyuk, P. D., Rubanenko, O. E., & Zhuk, I. A. (2005). Diagnostuvannya silovikh transformatoriv z vikoristannyam nechitkikh mnozhin. *Visnik Vinnitskogo politekhnichnogo institutu*, 1, 43–51. [in Ukrainian]

7. Rozvodyuk, M. P., Ovcharuk, V. V., Vdovichenko, V. E., & Ovchar, I. M. (2019). *Viznachennya zalishkovogo resursu silovogo maslyanogo transformatora na bazi nechitkoi logiki [Determination of the residual life of the power oil transformer based on fuzzy logic]* Monografia. Pokonferencyjna. Science, research, development #16. Technics and technology. Barcelona 29.04.2019 – 30.04.2019. Związku Radzieckiego oraz bylej Jugosławii. Warszawa.

8. Rubanenko, O. E., Labzun, M. P., & Grishchuk, M. O. (2017). Viznachennya defektiv transformatornogo obladnannya z vikoristannyam chastotnikh diagnostichnikh parametriv. *Visnik NTU «KhPI»*. Kharkiv, 23 (1245), 41–46. [http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/31931/1/vestnik\\_KhPI\\_2017\\_23\\_Rubanenko\\_Vyznachennia.pdf](http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/31931/1/vestnik_KhPI_2017_23_Rubanenko_Vyznachennia.pdf)

9. Tenbohlen, S., Vahidi, F., Müller, P., Gebauer, J., & Krüger, M. (2012). Zuverlässigkeitsbewertung von Leistungstransformatoren (em inglès), Proc. Stuttgarter Hochspannungssymposium, 61–70.

10. Rahimpour, E., Jabbari, M., & Tenbohlen, S. (2010). Mathematical comparison methods to assess transfer functions of transformers to detect different types of mechanical faults. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25 (4), 2544–2555.

11. Kosterev, N. V., Bardik, E. I., Vozhakov, R. V., & Kurach, T. Yu. (2008). Nechetkie algoritmy otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya i prognozirovaniya ostatochnogo resursa elektrooborudovaniya. *Naukovi pratsi DonNTU. Elektrotekhnika i energetika*. Donetsk, 8 (140), 65–70. [in Russian]

12. Yasins'kiy, Yu. O., Nemchinov, A. O., & Nikishin, O. M. (2010). Prognozuvannya tekhnichnogo stanu izolyatsii elektroobladnannya z urakhuvannyam yakosti spozhivaemoi elektroenergii. *Sistemi obrobki informatsii*. Kharkiv, 9 (90), 130–133. [in Ukrainian]

13. Bashirov, M. G., Prakhov, I. V., Bogdanov, D. I., Bulankin, E. I., & Molchanov, N. A. (2016). Sovremennye metody otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya i prognozirovaniya resursa vysokovoltного transformatora. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodородного syr'ya*. Moscow, 4, 63–66. [in Russian]

14. Hui Song, Jiejie Dai, Lingen Luo, Gehao Sheng & Xiuchen Jiang (2018). Power Transformer Operating State Prediction Method Based on an LSTM Network.

*Energies*, 11 (4), 914. <https://doi.org/10.3390/en11040914>

15. Osama, E. Gouda & Adel, Z. El Dein. (2019). Prediction of Aged Transformer Oil and Paper Insulation. *Electric Power Components and Systems*, 47 (4–5), 406–419. <https://doi.org/10.1080/15325008.2019.1604848>

16. Zakharov, V. N. (1975). *Avtomaty s raspredelennoy pamyat'yu [Distributed memory machines]*. Moscow: Energiya. [in Russian]

17. Zakharov, N. G., & Rogov, V. N. (2003). *Sintez tsifrovyykh avtomatov: uchebnoe posobie [Synthesis of digital automata: a training manual]*. Ulyanovsk: UISTU. [in Russian]

18. Rozvodyuk, M. P., & Bombik, V. S. (2019). Sintez strukturi pristroyu dlya viznachennya zalishkovogo resursu asinkhronnogo dviguna z korotkozamknemim rotorom. *Visnik Vinnits'kogo politekhnichnogo institutu*. Vinnitsya, 2 (143), 52–60. [in Ukrainian]

19. Ovsiyak, V., & Ovsiyak, Yu. Teoriya sekvensiynikh algoritmiv yak zasib pobudovi matematichnogo, lingvistichnogo, algoritmichnogo ta informatsiynogo zabezpechennya SAPR [The theory of sequential algorithms as a means of constructing mathematical, linguistic, algorithmic and information support of CAD]. [http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/35686/1/9\\_32-41.pdf](http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/35686/1/9_32-41.pdf)

20. Mokin, B. I., & Grabko, V. V. (2001). Pristriy dlya vimiryuvannya spratsyuvannya silovikh transformatoriv [Device for measuring the operation of power transformers]. Patent UA, no. 34253. Bull. 1. [in Ukrainian]

Стаття надійшла 17.09.2019.