РАЗРАБОТКЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ МАСЛЯНЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

I.K. Ismoilov

Fergana state technical university, Fergana, Uzbekistan

E-mail: i.ismoilov@ferpi.uz

Annotatsiya. Moli kuch transformatorlari tarmoqdagi elektr energiyasini taqsimlash va taqsimlash jarayonida muhim rol o‘ynaydi. Elektr tarmog‘ida moyli kuch transformatorlari kuchli zanjirlarni ulash hisobiga samarali ishlashni ta‘minlaydi, bu esa elektr uzatish tizimlarining optimal va barqaror ishlashini kafolatlaydi. Asosiy elementlarning texnik holati isitish tizimiga bevosita ta‘sir ko‘rsatadigan moy kuch transformatorlarining ish jarayoni bilan belgilanadi. Moyli kuch transformatorining magnit o’zagi va chulg’ami asosiy issiqlik tarqatuvchi elementlardir. Ushbu maqolada ekspress diagnostika vaqtida bankida o‘lchangan tashqi harorat va pasport ma‘lumotlari asosida moyli kuch transformatorlarining issiqlik tizimini baholash uchun imitatsion modeli ishlab chiqilgan.

Kalit so‘zlar: Moyli kuch transformatorlari, sovutish tizimi, texnik holatni baholash, tmitatsion model, noaniq mantiq, Mamdani usuli (Mamdani fuzzy logic), Matlab Simulink, issiqlik parametrlari, diagnostika va monitoring, aktiv quvvat yo‘qotishlari, Ekspress diagnostika

Аннотатция. Масляные силовые трансформаторы играют важную роль в процессе распределения и распределения электроэнергии в сети. В электросети масляные силовые трансформаторы обеспечивают эффективную работу за счет соединения между собой мощных контуров, что гарантирует оптимальную и стабильную работу систем передачи электроэнергии. Техническое состояние основных элементов определяется рабочим процессом масляных силовых трансформаторов, непосредственно влияющих на систему отопления. Магнитопровод и катушка масляного силового трансформатора являются основными теплоотводящими элементами. В данной работе разработана имитационная модель для оценки тепловой системы масляных силовых трансформаторов на основе внешней температуры и паспортных данных, измеренных в резервуаре при экспресс-диагностике.

Ключевые слова: Масляные силовые трансформаторы, система охлаждения, оценка технического состояния, имитационная модель, нечеткая логика, нечеткая логика Мамдани, Matlab Simulink, тепловые параметры, диагностика и мониторинг, потери активной мощности, экспресс-диагностика

ISSN 3030-3907

Abstract. Oil power transformers play an important role in the process of distribution and distribution of electric power in the network. In the electric network, oil power transformers ensure efficient operation due to the connection of powerful circuits, which guarantees optimal and stable operation of power transmission systems. The technical condition of the main elements is determined by the working process of oil power transformers, which directly affect the heating system. The magnetic circuit and coil of the oil power transformer are the main heat-dissipating elements. In this paper, a simulation model is developed to assess the thermal system of oil power transformers based on the external temperature and passport data measured in the tank during express diagnostics.

Keywords: Oil power transformers, cooling system, technical condition assessment, simulation model, fuzzy logic, Mamdani fuzzy logic, Matlab Simulink, thermal parameters, diagnostics and monitoring, active power losses, express diagnostics

Введение:

Масляные силовые трансформаторы являются ключевыми элементами в обеспечении стабильной работы электроэнергетической системы[1-2]. Они выполняют функции преобразования электрической энергии с одной напряженности на другую, что позволяет эффективно передавать энергию на большие расстояния с минимальными потерями[2-7]. Эти трансформаторы обеспечивают надежное и бесперебойное электроснабжение, что особенно важно для поддержания работы критически важных объектов, таких как промышленные предприятия, больницы, транспортные системы и другие инфраструктуры[3-8]. Надежная работа масляных силовых трансформаторов способствует снижению риска аварий и перебоев в электроснабжении, что, в свою очередь, обеспечивает стабильность и безопасность энергетической системы в целом[4-11].

По данным текущей статистики, более 60% масляных силовых трансформаторов в эксплуатации уже более 25 лет[1-22]. С каждым годом количество таких трансформаторов увеличивается, поскольку новые устройства постепенно стареют и переходят в категорию долгосрочной службы[3-11]. Это свидетельствует о том, что значительная часть электроэнергетической инфраструктуры основана на оборудовании с длительным сроком эксплуатации, что может приводить к увеличению вероятности отказов и неисправностей из-за естественного износа и старения компонентов[1-9].

В этой связи диагностика масляных силовых трансформаторов играет ключевую роль и должна рассматриваться как неотъемлемая часть, напрямую связанная с устойчивой и надежной работой

ISSN 3030-3907

электроэнергетических систем[5-13]. Своевременная диагностика позволяет выявлять потенциальные неисправности на ранних стадиях, оценивать степень износа и принимать превентивные меры для продления срока службы оборудования[3-7]. Это не только способствует поддержанию высокого уровня надежности и безопасности энергоснабжения, но и позволяет существенно сократить затраты, связанные с аварийными заменами и внеплановыми ремонтами[6-9]. Таким образом, регулярная диагностика и обслуживание масляных силовых трансформаторов являются критически важными мерами для обеспечения долгосрочной устойчивости и эффективности всей энергетической инфраструктуры[2-6].

Диагностику масляных силовых трансформаторов следует рассматривать как важнейший элемент, напрямую связанный с поддержанием устойчивой работы электроэнергетических систем[4-7]. Практика регулярного диагностирования этих трансформаторов позволяет более эффективно управлять энергоресурсами, планировать ремонтные работы и обеспечивать стабильное и бесперебойное энергоснабжение, что, в свою очередь, положительно сказывается на экономике и надежности всей энергетической инфраструктуры[7-26].

Замена, обновление или капитальный ремонт масляного силового трансформатора требуют значительных финансовых вложений и временных ресурсов. Однако своевременная диагностика позволяет выявлять потенциальные неисправности на ранних стадиях и устранять их с минимальными затратами[8-31]. Это позволяет не только избежать крупных расходов на капитальный ремонт или замену оборудования, но и значительно продлить срок службы существующих трансформаторов[12-30].

Регулярная проверка технического состояния масляных силовых трансформаторов помогает предотвратить потерю эффективности работы, вызванную проблемами с охлаждением или другими дефектами[11-19]. Диагностика также позволяет выявить возможные отклонения от нормы и своевременно устранить их, что минимизирует риски отказов и аварий[14-19].

Кроме того, соответствие нормативным требованиям и стандартам имеет важное значение[22-31]. В разных странах существуют специфические международные требования к техническому обслуживанию и диагностике электрооборудования[15-29]. Регулярное выполнение этих требований помогает обеспечивать высокий уровень надежности оборудования, предотвращать аварийные ситуации и поддерживать стабильность электросетей[13-13].

ISSN 3030-3907

Диагностика играет ключевую роль в удовлетворении вышеперечисленных требований[12-21]. На основании полученных результатов диагностических исследований разрабатываются планы ремонтов, что значительно упрощает процесс планирования и создает широкие возможности для оптимизации организационной работы[14-22]. Регулярная диагностика масляных силовых трансформаторов также позволяет минимизировать их негативное воздействие на окружающую среду, предотвращая утечку масла и других вредных веществ[5-11]. Таким образом, непрерывный мониторинг состояния оборудования помогает снизить его экологический след и способствует защите окружающей среды[12-19].

Цель данной научной работы - использование метода нечеткой логики в экспресс-диагностике состояния системы охлаждения масляного силового трансформатора[19-23]. Этот подход предполагает анализ оборудования в рабочем состоянии на основе паспортных данных, величины нагрузки, параметров бака и внешней температуры[21-31]. Применение метода нечеткой логики позволяет более точно оценить текущее состояние трансформатора и принять своевременные меры по его обслуживанию и ремонту, что повышает общую надежность и эффективность работы электроэнергетической системы[1-31].

1. Метод исследования

Для оценки состояния системы охлаждения масляных силовых трансформаторов, эксплуатируемых в электрических сетях, собираются данные о температуре бака трансформатора и окружающей среды. Эти данные позволяют выявить возможные отклонения в работе системы охлаждения и принять своевременные меры для предотвращения перегрева и выхода оборудования из строя.

На основе экспериментальных данных была разработана имитационная модель экспресс-оценки состояния системы охлаждения масляного силового трансформатора с использованием программы Matlab. Эта модель позволяет проводить быстрый и точный анализ параметров работы трансформатора в реальных условиях эксплуатации, что способствует улучшению мониторинга его состояния, оперативному реагированию на изменения в работе системы охлаждения и принятию обоснованных решений по техническому обслуживанию и ремонту оборудования.

3. Методы:

Основными параметрами, описывающими состояние системы охлаждения масляного силового трансформатора, температура бака ($T_{tb.rans}$), температура наружного воздуха (T_t), потери активной мощности

ISSN 3030-3907

на холостом ходу (ΔP_{xx}), потери активной мощности при нагрузки ($\Delta P_{n.trans}$), номинальная мощность ($P_{n.trans}$), высокое и низкое напряжение (U_{1n}, U_{2n}).

Нарушение технического состояния магнитопровода и катушки, являющихся основными источниками тепла в процессе работы масляного силового трансформатора, приводит к изменению процесса теплообмена внутри устройства. Это вызывает изменения в температурном режиме, что может указывать на наличие повреждений в сердечнике или катушке трансформатора.

Повреждения магнитопровода и катушки имеют характерные тепловые изменения: при возникновении дефектов или износа в этих компонентах происходит аномальное повышение температуры, не соответствующее нормальным рабочим условиям. Такие изменения могут быть вызваны ухудшением изоляции, короткими замыканиями в обмотках, механическими повреждениями или износом материалов. Эти тепловые отклонения позволяют выявить потенциальные проблемы на ранних стадиях и принять необходимые меры для предотвращения серьезных повреждений и сбоев в работе трансформатора, что повышает его общую надежность и продлевает срок службы.

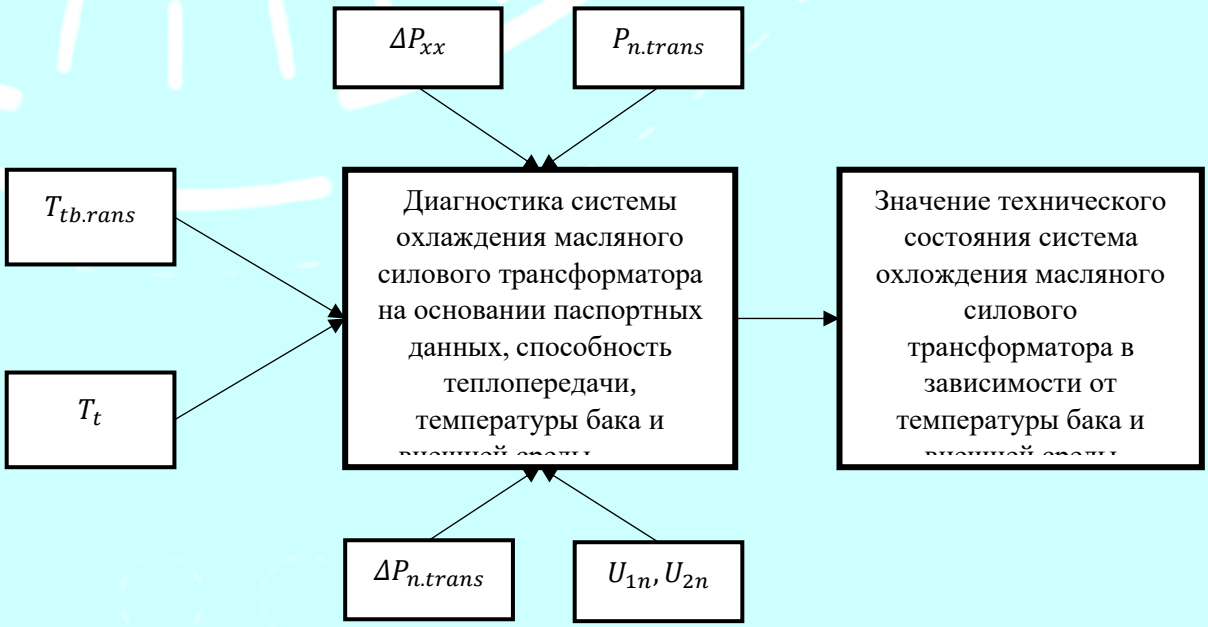


Рисунок 1. Структурная схема определения значения состояния система охлаждения масляного силового трансформатора по температуре бака и масла

В качестве входных переменных для оценки технического состояния системы охлаждения масляного силового трансформатора были приняты: Потеря активной мощности без нагрузки (ΔP_{xx}), потери активной мощности

ISSN 3030-3907

при нагрузки ($\Delta P_{n.trans}$), номинальная мощность ($P_{n.trans}$), высокое и низкое напряжение (U_{1n}, U_{2n}), tank temperature ($T_{tb.rans}$) температура наружного воздуха (T_t).

Для диагностики системы охлаждения масляных силовых трансформаторов, работающих в электрических сетях, использовалось правило “если-то”. Согласно этому правилу: если температура масляного трансформатора находится в рабочем диапазоне и если магнитопровод и катушка исправны, то температура бака должна быть нормальной.

Для анализа состояния трансформатора числовые показатели, отражающие эту ситуацию, преобразовывались в лингвистические переменные с помощью специальных правил. При этом использовался метод нечеткой логики, который позволяет учитывать неопределенность и неточность входных данных. Метод нечеткой логики позволяет формулировать более гибкие и адаптивные правила диагностики, обеспечивая надежную оценку состояния оборудования даже при отсутствии точных количественных данных. Это повышает точность и эффективность мониторинга состояния трансформаторов, что позволяет своевременно выявлять потенциальные проблемы и минимизировать риски неисправностей.

Правило “если-то” использовано для диагностики системы охлаждения масляных силовых трансформаторов, работающих в электрических сетях. Если температура масляного силового трансформатора находится в рабочем диапазоне, если магнитопровод и катушка находятся в исправном состоянии, то температура бака должна быть нормальной.

Показатели, отражающие эту ситуацию, приводились в числовых значениях и использовались специальные правила для их преобразования в лингвистические показатели. Мы использовали метод нечеткой логики.

На основе метода нечеткой логики имитационная модель была реализована в следующей последовательности. Связь между входными и выходными переменными осуществляется по правилу “Если-то”. Анализ взаимосвязи между активной рассеиваемой мощностью, номинальной мощностью, высоким и низким напряжением, температурой бака и внешними температурными параметрами системы охлаждения в условиях эксплуатации – “B”, тогда состояние системы охлаждения масляного силового трансформатора может быть “B”. .

Оценка выходных и входных переменных производилась с использованием десяти символов: “A+”, “A”, “A-”, “B+”, “B”, “B-”, “C+”, “C”, “C-” , “F”, “F-”.

3. Полученные результаты и их анализ:

ISSN 3030-3907

На рисунке 2 представлена функция нечеткой логики Мамдани, которая используется для изменения значения состояния выходной переменной с целью оценки состояния системы охлаждения силового масляного трансформатора. Модель Мамдани основывается на правилах вида “если-то” и применяет нечеткие множества для обработки входных данных, таких как температура масла, состояние магнитопровода и катушки. Эти входные данные преобразуются в нечеткие лингвистические переменные, которые затем используются для определения выходного значения - состояния системы охлаждения.

Функция Мамдани позволяет интерпретировать изменения в параметрах работы трансформатора, отображая их в виде изменяющейся выходной переменной, что дает возможность оценить эффективность охлаждения трансформатора. Использование нечеткой логики в этом контексте помогает учесть неопределенности в измерениях и создать более точную модель, которая отражает реальное состояние оборудования и помогает принимать обоснованные решения по его обслуживанию и ремонту.

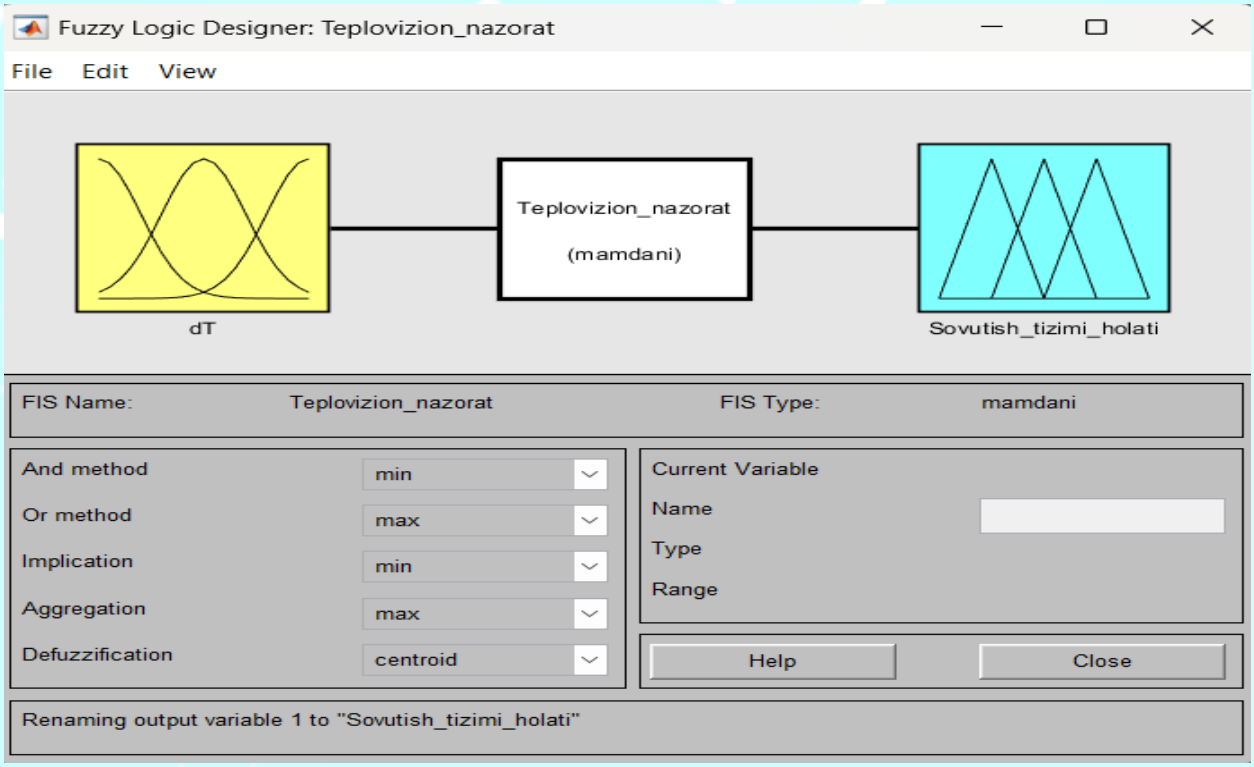


Рисунок 2. Схема оценки системы охлаждения масляного силового трансформатора с использованием нечеткой логики

ISSN 3030-3907

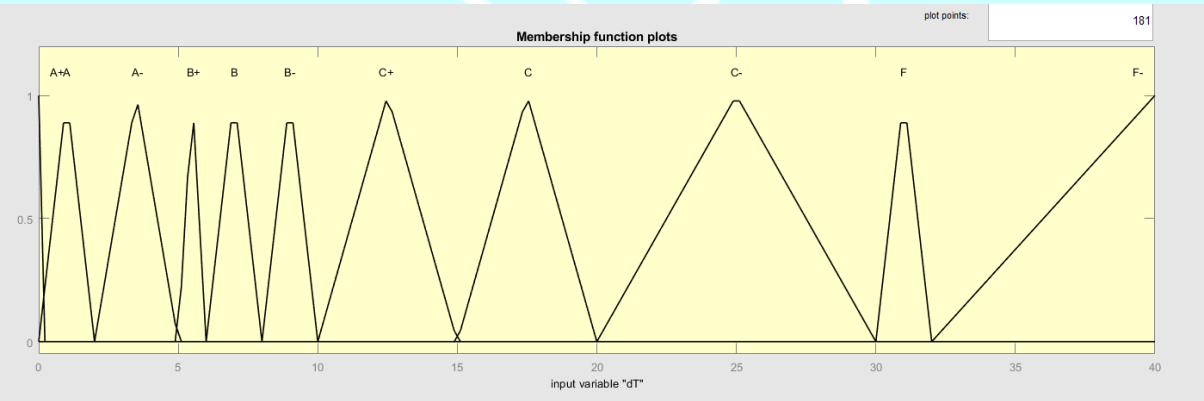


Рисунок 3. Функция принадлежности входной переменной “ΔT”

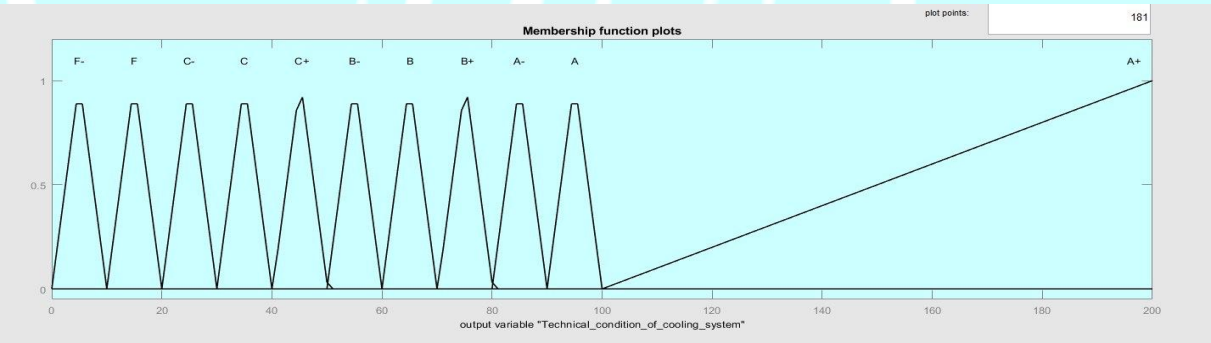


Рисунок 4. Выходной переменной является функция принадлежности “Техническое состояние масляного силового трансформатора”

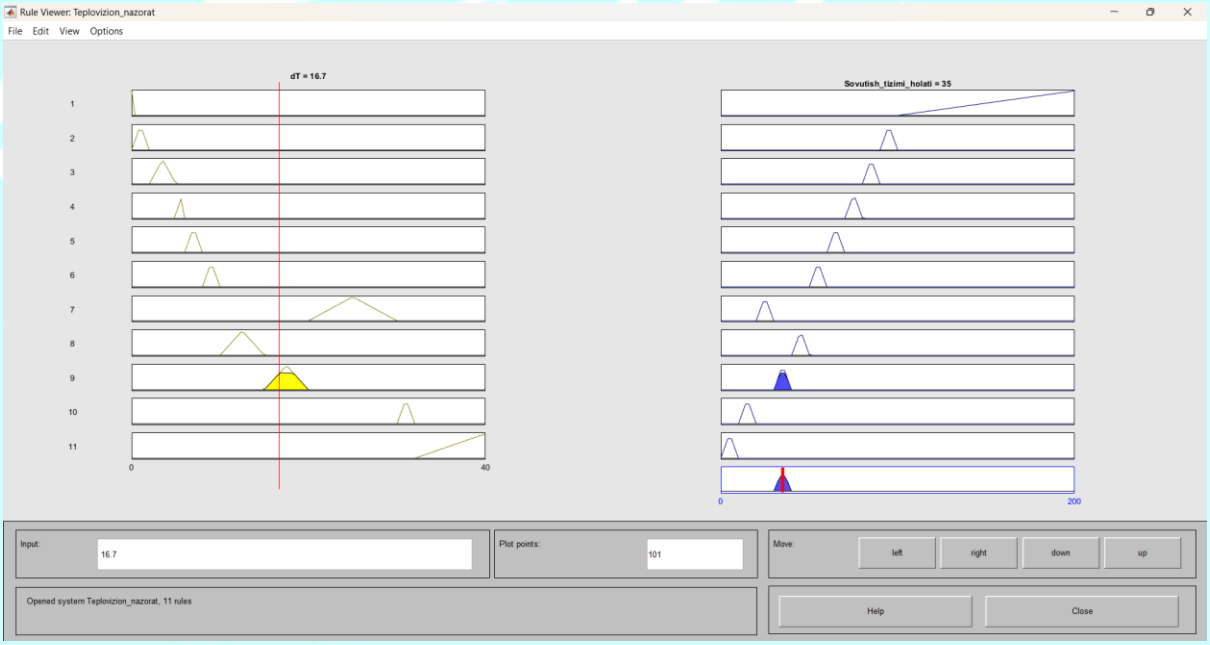


Рисунок 5. База правил процесса оценки технического состояния масляного силового трансформатора с использованием нечеткой логики

В программе Matlab simulink проведена экспресс-диагностика технического состояния “Масляного силового трансформатора” с использованием метода нечеткой логики Мамдани.

При оценке значение выходного параметра принималось от 0 до 100. Каждый шаг делится на 10, наименьшее значение - 0, наибольшее - 100.

ISSN 3030-3907

Если выходное значение находится в диапазоне [0:10], состояние масляного силового трансформатора - A+.

Если выходное значение находится в диапазоне [10:20], состояние масляного силового трансформатора - A.

Если выходное значение находится в диапазоне [20:30], состояние масляного силового трансформатора - A-.

Если выходное значение находится в диапазоне [30:40], состояние масляного силового трансформатора - B+.

Если выходное значение находится в диапазоне [40:50], состояние масляного силового трансформатора - B.

Если выходное значение находится в диапазоне [50:60], состояние масляного силового трансформатора - B-.

Если выходное значение находится в диапазоне [60:70], состояние масляного силового трансформатора - C+.

Если выходное значение находится в диапазоне [70:80], состояние масляного силового трансформатора - C.

Если выходное значение находится в диапазоне [80:90], состояние масляного силового трансформатора - C-.

Если выходное значение находится в диапазоне [90:100], состояние масляного силового трансформатора - F.

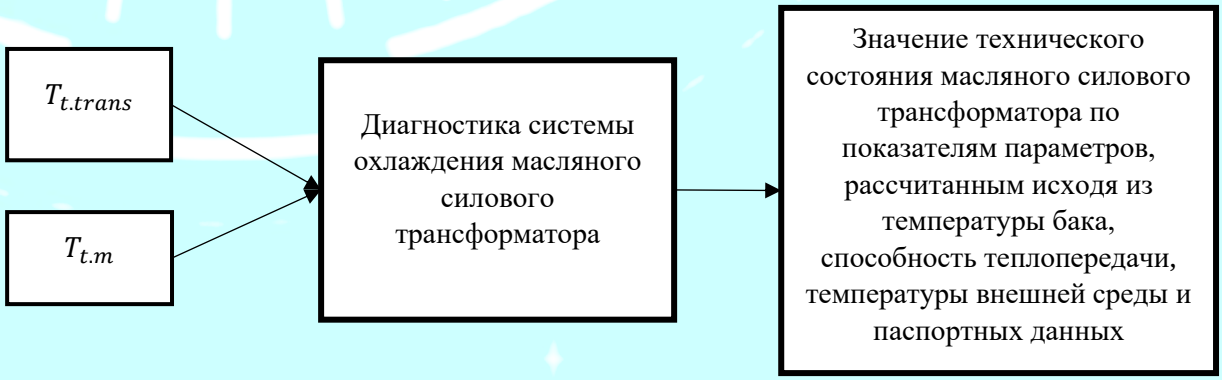


Рисунок 4. Структурная схема определения значения состояния системы охлаждения масляного силового трансформатора по температуре бака, внешней среды и паспортным данным.

Функции принадлежности выходной переменной “Техническое состояние масляного силового трансформатора”:

$$\text{“A+”}, \mu_{A+}(\Delta T) = \begin{cases} 1 - \frac{\Delta T}{2}, & if \;\; 0 \le \Delta T \le 2 \\ 0, & 0 > \Delta T, \;\; 2 \le \Delta T \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{“A”}, \;\; \mu_{A}(\Delta T) = \begin{cases} \frac{\Delta T - 2}{1{,}5}, & if \;\; 2 \le \Delta T \le 3{,}5 \\ \frac{5 - \Delta T}{1{,}5}, & if \;\; 3{,}5 \le \Delta T \le 5 \end{cases} \quad (2)$$

ISSN 3030-3907

"A-", $\mu_{A-}(\Delta T) = \begin{cases} \frac{\Delta T-5}{0,5}, & if \ \ 5 \le \Delta T \le 5,5 \\ \frac{6-\Delta T}{0,5}, & if \ \ 5,5 \le \Delta T \le 6 \end{cases}$ (3)

"B+", $\mu_{B+}(\Delta T) = \begin{cases} \frac{\Delta T-6}{1}, & if \ \ 6 \le \Delta T \le 7 \\ \frac{8-\Delta T}{1}, & if \ \ 7 \le \Delta T \le 8 \end{cases}$ (4)

"B", $\mu_B(\Delta T) = \begin{cases} \frac{\Delta T-8}{1}, & if \ \ 8 \le \Delta T \le 9 \\ \frac{10-\Delta T}{1}, & if \ \ 9 \le \Delta T \le 10 \end{cases}$ (5)

"B-", $\mu_{B-}(\Delta T) = \begin{cases} \frac{\Delta T-10}{2,5}, & if \ \ 10 \le \Delta T \le 12,5 \\ \frac{15-\Delta T}{2,5}, & if \ \ 12,5 \le \Delta T \le 15 \end{cases}$ (6)

"C+", $\mu_{c+}(\Delta T) = \begin{cases} \frac{\Delta T-15}{2,5}, & \text{if } 15 \le \Delta T \le 17,5 \\ \frac{20-\Delta T}{2,5}, & if \ \ 17,5 \le \Delta T \le 20 \end{cases}$ (7)

"C", $\mu_c(\Delta T) = \begin{cases} \frac{\Delta T-20}{5}, & if \ \ 20 \le \Delta T \le 25 \\ \frac{30-\Delta T}{5}, & if \ \ 25 \le \Delta T \le 30 \end{cases}$ (8)

"C-", $\mu_{c-}(\Delta T) = \begin{cases} \frac{\Delta T-30}{1}, & if \ \ 30 \le \Delta T \le 31 \\ \frac{32-\Delta T}{1}, & if \ \ 31 \le \Delta T \le 32 \end{cases}$ (9)

"F", $\mu_F(\Delta T) = \begin{cases} \frac{\Delta T-32}{4}, & if \ \ 32 \le \Delta T \le 36 \\ \frac{40-\Delta T}{4}, & if \ \ 36 \le \Delta T \le 40 \end{cases}$ (10)

"F-", $\mu_{F-}(\Delta T) = \begin{cases} 1 - \frac{\Delta T-122}{4}, & agar \ \ 122 \le \Delta T \le 150 \\ 0, \quad \text{otherwise} \end{cases}$ (11)

Функция принадлежности для выходной переменной

"A+", $\mu_{A+}(y_{sov}) = \begin{cases} 1, & if \ \ 100 \le y_{sov} \le 200 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$ (12)

"A", $\mu_A(y_{sov}) = \begin{cases} \frac{y_{sov}-90}{5}, & if \ \ 90 \le y_{sov} \le 95 \\ \frac{100-y_{sov}}{5}, & if \ \ 95 \le y_{sov} \le 100 \end{cases}$ (13)

"A-", $\mu_{A-}(y_{sov}) = \begin{cases} \frac{y_{sov}-80}{5}, & \text{if } 80 \le y_{sov} \le 85 \\ \frac{90-y_{sov}}{5}, & if \ \ 85 \le y_{sov} \le 90 \end{cases}$ (14)

"B+", $\mu_{B+}(y_{sov}) = \begin{cases} \frac{y_{sov}-70}{5}, & if \ \ 70 \le y_{sov} \le 75 \\ \frac{80-y_{sov}}{5}, & if \ \ 75 \le y_{sov} \le 80 \end{cases}$ (15)

ISSN 3030-3907

$$\text{“B”}, \quad \mu_B(y_{sov}) = \begin{cases} \frac{y_{sov}-60}{5}, & if \ \ 60 \le y_{sov} \le 65 \\ \frac{70-y_{sov}}{5}, & if \ \ 65 \le y_{sov} \le 70 \end{cases} \tag{16}$$

$$\text{“B-”}, \ \mu_{B-}(y_{sov}) = \begin{cases} \frac{y_{sov}-50}{5}, & if \ \ 50 \le y_{sov} \le 55 \\ \frac{60-y_{sov}}{5}, & if \ \ 55 \le y_{sov} \le 60 \end{cases} \tag{17}$$

$$\text{“C+”}, \quad \mu_{C+}(y_{sov}) = \begin{cases} \frac{y_{sov}-40}{5}, & if \ \ 40 \le y_{sov} \le 45 \\ \frac{50-y_{sov}}{5}, & if \ \ 45 \le y_{sov} \le 50 \end{cases} \tag{18}$$

$$\text{“C”}, \ \mu_C(y_{sov}) = \begin{cases} \frac{y_{sov}-30}{5}, & \text{if } 30 \le y_{sov} \le 35 \\ \frac{40-y_{sov}}{5}, & if \ \ 35 \le y_{sov} \le 40 \end{cases} \tag{19}$$

$$\text{“C-”}, \ \mu_{C-}(y_{sov}) = \begin{cases} \frac{y_{sov}-20}{5}, & \text{if } 20 \le y_{sov} \le 25 \\ \frac{30-y_{sov}}{5}, & if \ \ 25 \le y_{sov} \le 30 \end{cases} \tag{20}$$

$$\text{“F”}, \ \mu_F(y_{sov}) = \begin{cases} \frac{y_{sov}-10}{5}, & if \ \ 10 \le y_{sov} \le 15 \\ \frac{20-y_{sov}}{5}, & if \ \ 15 \le y_{sov} \le 20 \end{cases} \tag{21}$$

$$\text{“F-”}, \ \mu_{F-}(y_{sov}) = \begin{cases} \frac{y_{sov}}{5}, & if \ \ 0 \le y_{sov} \le 5 \\ 2 - \frac{y_{sov}}{5}, & if \ \ 5 \le y_{sov} \le 10 \end{cases} \tag{22}$$

С использованием нечеткой логики были определены функции принадлежности для входных (табл. 1) и выходных (табл. 2) переменных с использованием T,L,γ -классов. Установлены правила зависимости между входными и выходными переменными:

1- правило: $W_{sov1} = \min(\mu_{A+}(\Delta T), 1) \rightarrow \mu_{A+}(y_{\boldsymbol{sov1}})$

2- правило: $W_{sov2} = \min(\mu_A(\Delta T), 1) \rightarrow \mu_A(y_{\boldsymbol{sov2}})$

11- правило: $W_{sov1} = \min(\mu_{F-}(\Delta T), 1) \rightarrow \mu_{F-}(y_{\boldsymbol{sov11}})$

Определение общей функции принадлежности для каждого нечеткого множества в выходной переменной:

$$\mu^*_{A+}(y_{sov1}) = \max(W_{sov1}, 0)$$
$$\mu^*_{A}(y_{sov2}) = \max(W_{sov2}, 0)$$
$$\mu^*_{F-}(y_{sov11}) = \max(W_{sov11}, 0)$$

Масляные силовые трансформаторы определяют методом центрирования для определения значения технического состояния системы охлаждения следующим образом:

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^{11} W_i * \mu_i^*(y)}{\sum_{i=1}^{11} \mu_i^*(y)}$$

ISSN 3030-3907

Температуру приготовления и температуру окружающей среды определяют опытным путем. Потери активной мощности на холостом ходу, потери активной мощности под нагрузкой, номинальная мощность, высокое и низкое напряжение, температура бака и параметры температуры наружного воздуха; По установленной методике магнитная цепь масляного силового трансформатора обеспечивает экспресс-оценку технического состояния. .

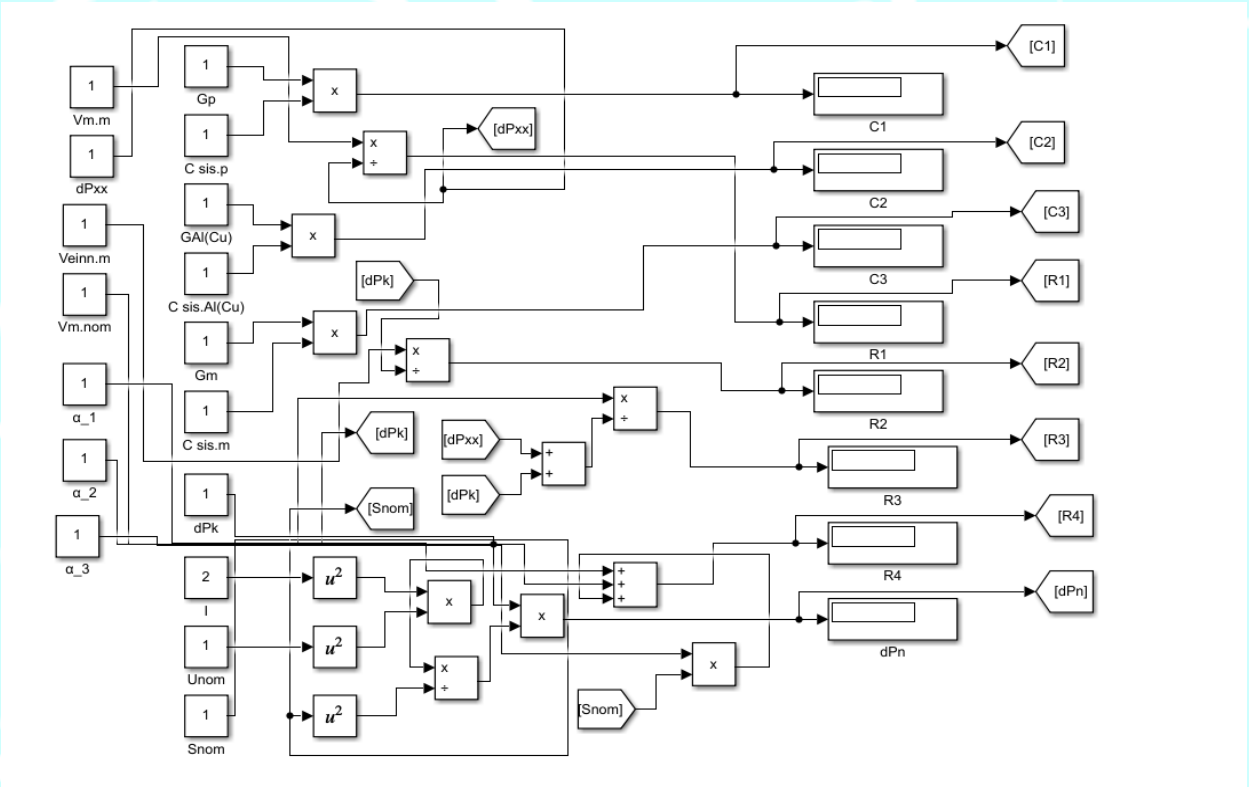


Figure 5. Модель Simulink для экспресс-оценки технического состояния масляного силового трансформатора

Были собраны средние значения температур окружающей среды, бака и масла трансформатора. Дополнительно были использованы паспортные характеристики устройства для комплексной оценки состояния системы охлаждения.

Согласно имитационной модели, представленной на рисунке 5 выше. Состояние системы охлаждения масляного силового трансформатора оценивают по паспортным данным, температуре наружного воздуха и температуре бака. Математическая модель рассчитывает состояние системы охлаждения масляного силового трансформатора в зависимости от значения входных переменных.

4. Заключение

Созданная имитационная модель предназначена для диагностики масляных силовых трансформаторов. Модель позволяет оценить текущее состояние системы охлаждения и, на основе полученных данных, прогнозировать вероятность выхода из строя трансформатора.

ISSN 3030-3907

ЛИТЕРАТУРИ:

[1] K.A. Shamsiev, B.K. Shamsiev, S.V. Khamidov, «Increasing the reliability of the united power systems of central Asia in conditions of energy transition» // *E3S Web Conf.*, т. 384, сс. 0–3, 2023, doi: 10.1051/e3sconf/202338401020.

[2] T.K. Nasirov, G.G. Trofimov, S.V. Khamidov, R.M. Tanirbergenov, «Problems of ensuring reliability and sustainable development of the United energy system of Central Asia under the conditions of energy consumption growth» // *E3S Web Conf.*, т. 461, с. 01038, 2023, doi: 10.1051/e3sconf/202346101038.

[3] D.T. Yusupov, I.K.Ismoilov, A.E. Norboev, R.X. Beytullaeva, & A. A.Yuldashev (2024). Development of a simulation model for assessing the technical condition of oil power transformers by measuring vibroacoustic parameters. In E3S Web of Conferences (Vol. 510, p. 04014). EDP Sciences.

[4] D.I. Zalizny, «the Diagnosis Technique of Abnormal Heating of Power Capacitors» // *Energ. Proc. CIS High. Educ. institutions power Eng. Assoc.*, т. 59, release. 6, сс. 563–572, 2016, doi: 10.21122/1029-7448-2016-59-6-563-572.

[5] D.T. Yusupov, I.K. Ismoilov, A.E. Norboev, A.B. Sa'dullaev, & O.E. Babaev, (2024). Development of a simulation model for assessing the technical condition of the magnetic circuit of oil power transformers by measuring the temperature of the tank and the external environment. In E3S Web of Conferences (Vol. 510, p. 04013). EDP Sciences.

[6] A. Lankin, A. Baklanov, & I. Lankin, (2019). Analysis of diagnostic methods and functional state monitoring of power oil transformers in electrical substations. In E3S Web of Conferences (Vol. 135, p. 01021). EDP Sciences.

7] J. Wang, X. Zhang, F. Zhang, J. Wan, L. Kou, и W. Ke, «Review on Evolution of Intelligent Algorithms for Transformer Condition Assessment» // *Front. Energy Res.*, т. 10, release. May, сс. 1–15, 2022, doi: 10.3389/fenrg.2022.904109.

[8] M. Gutten, M. Šebok, D. Korenčiak, P. Brnčal, M. Kubiš, P. Żukowski, T.N. Koltunowicz. «Frequency Domain Diagnostics of Transformer Insulation» // Devices and Methods of Measurements 2019, vol. 10, no. 4, pp. 353–359 M.

[9] В. Лила, «Экспертная система диагностики силовых трансформаторов» // *Инженерный вестник Дона*, сс. 24–29, 2016.

[10] D.T.Yusupov, O. Kutbidinov, S. Samadov, E. Abdullaev, «Investigation of factors influencing the operational characteristics of traction transformers» // *E3S Web Conf.*, т. 274, 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202127413007.

[11] Е.Ф. Тозик, «Современные методы диагностики силовых трансформаторов во время эксплуатации» // *Angew. Chemie Int. Ed. 6(11), 951–952.*, т. 2, сс. 132–135, 2019.

[12] W. Sikorski, K. Walczak, «Power Transformer Diagnostics Based on

ISSN 3030-3907

Acoustic Emission Method» // *Acoust. Emiss. - Res. Appl.*, release. July, cc. 91–116, 2013, doi: 10.5772/55211.

[13] Т.М. Чупак, «Прогнозирование технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов» // *Rev. Bras. Ergon.*, т. 9, вып. 2, сс. 7–21, 2007.

[14] A. Salam, Q.M. Rahman, F. Wen, S. P. Ang, и W. Voon, «Causes of transformer failures and diagnostic methods – A review» // *Renew. Sustain. Energy Rev.*, т. 82, release. xxxx, сс. 1442–1456, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.165.

[15] D.T. Yusupov, B.K. Avazov, O.M. Kutbidinov, M. Bazarov, «Cleaning of transformer oils using the electric field» // *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, т. 1231, release. 1, 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1231/1/012024.

[16] Lin, Du Jiang, Lei Li, Fuqi Zhu, Deheng Tan, Kexiong Wu, Chengqi Jin, Xianhe Wang, Changchang Cheng, T. C., «On-line partial discharge monitoring and diagnostic system for power transformer» // *Tsinghua Sci. Technol.*, т. 10, вып. 5, сс. 598–604, 2005, doi: 10.1016/S1007-0214(05)70125-5.

[17] M. Gutten, M. Šebok, D. Korenčiak1 , P. Brnčal1 , M. Kubiš1 , P. Żukowski2 , T.N. Koltunowicz G. Ribaeg и Z. Vol, «Scientific and technical journal in fisheries» // т. 68, release. February, 2010.

[18] А.А. Яхья, К.И. Сагалакова, В. М. Левин., Совершенствование моделей оценки состояния трансформаторов ГЭС в режиме On-Line мониторинга // Гидроэлектростанции в XXI веке : сб. материалов 5 всерос. науч.-практ. конф., Саяногорск; Черемушки, 26-27 апр. 2018 г. – Саяногорск : Изд-во Сиб. федер. ун-т; Саяно-Шушен. фил., 2018. – С. 40–47.

[19] R.J. Miroslav Gutten, Daniel Korenciak, Peter Brncal, «Frequency Diagnostics of Insulating System of Power Transformers» // *Electr. Control Commun. Eng.*, т. 16, вып. 1, сс. 1–7, 2020, doi: 10.2478/ecce-2020-0001.

[20] I.K.Ismoilov, «Analysis of the Problem of Complex Technical Diagnostics of Power Transformers in Power Systems» // *EJET*, т. 13, вып. December, сс. 25–30, 2022.

[21] D.T. Yusupov, O.M. Kutbidinov, S.A. Samadov, E.S. Abdullaev, «Investigation of winding faults of traction transformers» // *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, т. 868, вып. 1, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/868/1/012026.

[22] Dilmurod Yusupov, Ibroximjon Ismoilov, Abdugani Rakhmatov, Orifjon Kilichov, Nusratillo Toshpulatov, Aziz Babayev, Oybek Matchonov, «Express diagnostics of power oil transformers by vibroacoustics and partial discharges» // *E3S Web Conf.*, т. 434, сс. 1–6, 2023, doi: 10.1051/e3sconf/202343401027.

[23] О.С. Мельникова «Метод расчета электрической прочности масляных

ISSN 3030-3907

каналов главной изоляции силовых трансформаторов» // *Vestn. IGEU*, вып. 5, сс. 48–55, 2020, doi: 10.17588/2072-2672.2020.5.048-055.

[24] Б. М. Моргалик, А.П. Прудников, «Виброакустический контроль состояния элементов подшипников качения» // Вестник Белорусско-Российского университета. 3, вып. 76, сс. 60–68, 2022, doi: 10.53078/20778481.

[25] Н.В. Грунтович, Е.А. Жук «Исследование причин частичных разрядов в силовых маслонаполненных трансформаторах» // Вестник Ггту им. П. О. Сухого № 4 сс. 60–67, 2019.

[26] И.К. Исмоилов, Н.В. Грунтович, «Прогнозирование электрической дуги внутри бака силового маслонаполненного трансформатора» // *FarPI ilmiy-texnika jurnali*, т. 13, сс. 326–328, 2022.

[27] В.А. Тихонов, «К вопросу о методе диагностики преобразовательных трансформаторов предприятия по производству алюминия» // *Syst. Methods. Technol.*, т. 4, вып. 4(40), сс. 98–104, 2018, doi: 10.18324/2077-5415-2018-4-98-104.

[28] N.V. Gruntovich, I.K. Ismoilov, T.K. Jabborov, E.A. Juk, «Повышения надёжности и точности технического диагностирования силовых маслонаполнуных трансформаторов» // Современный проблемы машиноведения. сборник научных трудов. В двух частях. Частб 2 сс. 19–20, 2023 г.

[29] I.K. Ismoilov, T.K. Zhabborov, «Research and problems of reliability of operation of power transformers at the enterprises of Fergana part of the power system of Uzbekistan» // Problems of energy and resource conservation special issue - 2021 сс. 106–110, 2021 г.

[30] T.K. Jabborov, I.K. Ismoilov, «Методы осмотра и анализа электрических систем» // Scientific-technical journal of FerPI сс. 209–212, 2022 г

[31] D.T. Yusupov, I.K. Ismoilov, U.T. Berdiev, O.M. Kutbidinov// Development of a simulation model for assessing the technical condition of the cooling system of oil power transformers by measuring the temperature of the tank and the external environment// Fifteen International Conference on Thermal Engineering: Theory and ApplicationsMay 28-June 1, 2024Tashkent, Uzbekistan

ISSN 3030-3907