

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

ВАСИЛЕВСЬКИЙ ВОЛОДИМИР ВАЛЕНТИНОВИЧ



УДК 621.314.2

**ПРОГНОЗУВАННЯ СТРОКУ СЛУЖБИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА
ЗА ДОПОМОГОЮ КОМПЛЕКСНОЇ МОДЕЛІ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ
ЦЕЛЮЛОЗНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ**

спеціальність 05.09.01 – електричні машини й апарати

Автореферат дисертації
на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі електричних та електронних апаратів Запорізького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник кандидат технічних наук, доцент
Поляков Михайло Олексійович,
Запорізький національний технічний університет,
професор кафедри електричних та електронних апаратів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Петрушин Віктор Сергійович,
Одеський національний політехнічний університет,
професор кафедри електричних машин;

кандидат технічних наук, доцент
Прус В'ячеслав В'ячеславович,
Кременчуцький національний університет
імені Михайла Остроградського,
доцент кафедри електричних машин та апаратів.

Захист відбудеться 14 березня 2019 р. о 12.30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий 07 лютого 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Юр'єва О.Ю.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Силовий трансформатор – електростатичний пристрій, який є одним з найважливіших елементів систем електропостачання. Підвищення експлуатаційної надійності і збільшення ресурсу трансформаторного обладнання шляхом розробки нових технологій його виробництва і експлуатації є актуальною науково-технічною задачею, особливо з огляду на загальну тенденцію старіння трансформаторного парку України. Аналіз поставок трансформаторів напругою 500 – 750 кВ підприємством ВАТ «Запоріжтрансформатор» на території України показує, що із 141 трансформатора 96 виготовлені до 1993 року. Отже, ці трансформатори або вже виробили свій номінальний строк служби, або близькі до цього. Більшість таких трансформаторів мають маслобар'єрну ізоляцію. Можливий строк служби силових маслонаповнених трансформаторів в значній мірі визначається станом целюлозної ізоляції. В процесі експлуатації ізоляція підпадає під вплив підвищеної температури, зволоження, окислення. Ці фактори впливають на її технічний стан в кожен певний момент часу і, відповідно, на строк служби трансформатора. Вирішення задачі прогнозування технічного стану целюлозної ізоляції як нових силових трансформаторів, так і трансформаторів, що експлуатуються, може бути отримано з використанням систем неперервного контролю. Такі системи виконують моніторинг технічного стану силового трансформатора та можуть давати прогноз залишкового ресурсу його целюлозної ізоляції з використанням відповідних математичних моделей, базуючись на результатах моніторингу. Однак, широке застосування систем неперервного контролю обмежено через їх технічну складність та високу вартість, що зумовлює перспективність удосконалення математичних моделей технічного стану електрообладнання, заснованих на стандартах.

Отже, розробка комплексної моделі технічного стану целюлозної ізоляції силового трансформатора для прогнозування її залишкового ресурсу та техніко-економічного обґрунтування стратегії технічного обслуговування трансформатора є актуальною науково-практичною задачею, яка визначила напрямок досліджень дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота відповідає науковим напрямкам робіт кафедри електричних та електронних апаратів Запорізького національного технічного університету: «Дослідження підвищення надійності та працездатності електричних апаратів та обладнання енергоємних виробництв» (ДБ 03412), 2012 – 2015 рр., «Дослідження систем прогнозування та покращення енергоефективності електромеханічних, електронних апаратів та обладнання енергоємних виробництв» (ДБ 03415), 2015 – 2018 рр.

Мета й завдання роботи. Метою роботи є удосконалення математичних моделей для прогнозування строку служби силового трансформатора та техніко-економічного обґрунтування стратегії його технічного обслуговування шляхом розробки комплексної моделі технічного стану целюлозної ізоляції.

Для досягнення мети поставлені *завдання*:

– аналіз методів визначення ресурсних характеристик целюлозної ізоляції;

- розробка моделі формування початкового ресурсу целюлозної ізоляції трансформатора на етапі його виробництва;
- розробка моделі технічного стану целюлозної ізоляції силового трансформатора на етапі експлуатації;
- розробка системи техніко-економічного обґрунтування вибору стратегії технічного обслуговування ізоляції трансформатора на стадії його експлуатації;
- вибір параметрів розробленої комплексної моделі технічного стану целюлозної ізоляції та її верифікація, реалізація моделі у вигляді програми та впровадження її в експлуатацію.

Об'єкт дослідження – процес формування та витрати ресурсу целюлозної ізоляції силового трансформатора під час зміни його технічного стану.

Предмет дослідження – методи та засоби оцінки і прогнозування ресурсних характеристик целюлозної ізоляції силового трансформатора.

Методи досліджень. Вирішення поставлених у дисертаційній роботі завдань досягнуто на базі методів математичного моделювання, теоретичних основ електротехніки і теорії надійності – при розробці комплексної моделі витрати ресурсу целюлозної ізоляції під час експлуатації, теорії графів, алгебри нечітких чисел та теорії надійності – при розробці моделі формування ресурсу целюлозної ізоляції трансформатора на етапі його виробництва, апроксимації розрахунково-експериментальних залежностей, методу Монте–Карло – для вибору параметрів розробленої комплексної моделі технічного стану целюлозної ізоляції.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше розроблена комплексна модель технічного стану целюлозної ізоляції силового трансформатора, яка відрізняється урахуванням впливу етапу виробництва на початкове значення ресурсу ізоляції, впливу проведення технічного обслуговування та зміни експлуатаційних факторів на швидкість витрати ресурсу ізоляції в експлуатації. Застосування моделі дозволило підвищити точність оцінки залишкового ресурсу ізоляції.

2. Вперше обґрунтована необхідність урахування при оцінці залишкового ресурсу целюлозної ізоляції силового трансформатора не лише результатів моніторингу трансформатора, а також якості виготовлення його вузлів та зміни швидкості витрати ресурсу ізоляції в результаті технічного обслуговування, що забезпечує можливість формування оптимальної стратегії технічного обслуговування.

3. Удосконалено розрахунковий метод визначення витрати ресурсу целюлозної ізоляції за рахунок коригування формули інтегралу старіння шляхом більш точної інтерполяції вихідних даних, що використовуються для побудови залежності швидкості старіння від вмісту вологи в целюлозній ізоляції та за рахунок застосування методу побудови графіку міграції вологи в системі целюлозна ізоляція – трансформаторне масло. Це дозволило отримати збіг результатів розрахунків скорочення строку служби целюлозної ізоляції з експериментальними даними.

4. Удосконалено розрахунковий метод визначення вологості целюлозної ізоляції силового трансформатора, який відрізняється урахуванням динаміки вологості в системі целюлозна ізоляція-трансформаторне масло внаслідок змінення теплового режиму трансформатора, що забезпечує можливість моделювання впливу зміни вологості целюлозної ізоляції на строк її служби.

Практичне значення отриманих результатів для електромашинобудування:

– розроблено комп'ютерну програму, яка дозволяє підвищити експлуатаційну надійність силового трансформатора шляхом моделювання процесу витрати ресурсу його целюлозної ізоляції впродовж життєвого циклу та вибору оптимальної стратегії технічного обслуговування трансформатора;

– розроблено методику оцінки впливу етапу виробництва силового трансформатора на початковий ресурс целюлозної ізоляції, яка дозволяє врахувати вплив порушень технологічного процесу на початкове значення ресурсу ізоляції трансформатора;

– розглянута можливість використання отриманих в дисертаційній роботі результатів при модернізації системи неперервного контролю SAFE-T (виробництва ТОВ «Енергоавтоматизація», м. Запоріжжя) силового трансформатора ТРДНС-40000/35-УХЛ 1, встановленої на Аксуській ТЕС у республіці Казахстан у 2015 році (довідка про можливість впровадження від 15.05.2018 р.). Методика прогнозування зносу целюлозної ізоляції силових маслонаповнених трансформаторів шляхом комп'ютерного моделювання та методика урахування впливу етапу виробництва вузлів силового трансформатора на ресурс целюлозної ізоляції впроваджені в проектно-конструкторській діяльності ПАТ «ВІТ», м. Запоріжжя (акт впровадження від 10.05.2018 р.).

Особистий внесок здобувача. Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. У роботах, які опубліковані у співавторстві, дисертанту належить: програмна реалізація ймовірнісних моделей технологічної та контрольної операцій, статистичне моделювання зміни факторів експлуатації силового трансформатора в періоді прогнозу за допомогою методу Монте – Карло, розробка програми для автоматизації розрахунків прогнозованих ресурсних характеристик целюлозної ізоляції силових трансформаторів, аналіз структури існуючих систем управління життєвим циклом целюлозної ізоляції силових трансформаторів, розробка моделі динаміки вологості в системі целюлозна ізоляція – трансформаторне масло, дослідження методики визначення границь оптимальності технологічних процесів виготовлення.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати досліджень доповідалися здобувачем та обговорювалися на міжнародних науково-практичних конференціях: "Електротехнічні та комп'ютерні системи: теорія і практика" (2017 р., м. Одеса), "Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів SIEMA" (2013 – 2014 рр., 2016 р., м. Харків), "Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки SIEMA" (2017 р., м. Харків), "Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні" (2013 р., м. Дніпро),

"Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах" (2015 р., м. Кременчук), "Проблеми сучасної електротехніки" (2014 р., м. Київ), "Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування" (2013 р., м. Херсон), "Тиждень науки" (2013 – 2016, 2018 рр., м. Запоріжжя).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 13 наукових публікаціях, з них: 8 статей у наукових фахових виданнях України (3 – у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web Of Science), 5 – у матеріалах конференцій.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається з анотацій двома мовами, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 153 сторінки, з них 46 рисунків по тексту; 4 рисунки на 2 окремих сторінках; 16 таблиць по тексту; списку з 130 найменувань використаних джерел на 16 сторінках, 3 додатків на 7 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність, сформульовано мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукова новизна та практична цінність досліджень, їх зв'язок з науковими програмами і планами. Наведено інформацію про апробацію, публікації і структуру дисертації.

У першому розділі проаналізовано сучасні системи неперервного контролю силових трансформаторів. Огляд систем неперервного контролю дозволив зробити висновок, що одним з найважливіших об'єктів контролю в трансформаторному обладнанні є целюлозна ізоляція. Більшість цих систем дозволяють виконувати постійний моніторинг таких параметрів, як температура масла і обмоток трансформатора, вміст газів у трансформаторному маслі, проводити розрахунок вологовмісту целюлозної ізоляції за вимірним вологовмістом трансформаторного масла, а також проводити розрахунок залишкового ресурсу ізоляції трансформатора. При розрахунках ресурсних характеристик целюлозної ізоляції використовуються моделі, наведені в стандартах.

Здійснено аналіз розрахункових методів оцінки скорочення строку служби целюлозної ізоляції. Визначено, що існуючі методи і моделі не дозволяють в достатній мірі враховувати зміну факторів експлуатації трансформатора і їх взаємозв'язок, до уваги не береться також проведення технічного обслуговування целюлозної ізоляції в ході експлуатації, зокрема сушіння, і його вплив на швидкість старіння ізоляції. При розрахунку ресурсу целюлозної ізоляції нового трансформатора не береться до уваги можлива наявність дефектів, внесених в трансформатор на стадії його виробництва.

Дано визначення комплексної моделі технічного стану целюлозної ізоляції силового трансформатора, під якою мається на увазі сукупність математичних моделей, що описують зміну технічного стану целюлозної ізоляції внаслідок впливу зовнішніх експлуатаційних факторів та проведення технічного обслуговування.

вування. Визначено, що необхідною є розробка такої комплексної моделі на основі існуючих методів та моделей. Проведений в розділі аналіз дозволив визначити основні напрямки дослідження і завдання, вирішення яких представлено в наступних розділах.

Другий розділ присвячено аналізу моделей технічного стану целюлозної ізоляції силового трансформатора. Процеси формування та витрати ресурсу ізоляції силового трансформатора на різних етапах його життєвого циклу представлені у вигляді комплексу моделей.

Модель формування потенційного ресурсу. З позицій поставленого завдання оцінки процесів формування та витрати ресурсу целюлозної ізоляції, фазу проектування, включаючи проектування технологічних процесів виготовлення вузлів трансформатора, характеризувано як процес прийняття рішень щодо конструкції і технології виготовлення, що обмежують потенційний ресурс. Також ця фаза характеризується як процес (звичайно, ненавмисного) внесення прихованих конструктивних і технологічних дефектів в трансформатор.

Розроблено *модель формування ресурсу трансформатора під час виготовлення.* Варіанти технологічного процесу розглядаються у вигляді спрямованого графа (рис.1). Вершини графа відповідають етапам, а дуги – варіантам технологічних операцій технологічного процесу з точки зору впливу окремих операцій на внесення, виявлення, усунення дефектів і зміни реального ресурсу окремих вузлів силового трансформатора.

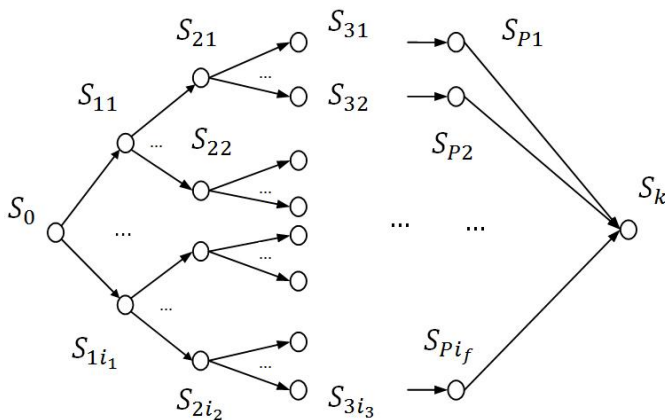


Рисунок 1 – Граф варіантів технологічного процесу

Вплив окремих технологічної та контрольної операцій на ресурс вузла силового трансформатора оцінюється з виразу

$$L'_{TOj} = L_{TOj} - \Delta L_{ij} \cdot (1 - p_{ijm}),$$

де L'_{TOj} – значення ресурсу після виконання j -ої технологічної операції; L_{TOj} – значення ресурсу перед виконанням j -ої технологічної операції; ΔL_{ij} – зменшення значення ресурсу в ході j -ої технологічної операції в i -му варіанті технологічного процесу; p_{ijm} – ефективність засобів контролю, тобто ймовірність не виявлення ними дефектів в ході j -ої технологічної операції в i -му варіанті технологічного процесу по m -ій характеристиці виробу.

Зменшення ресурсу в ході технологічного процесу за шляхом μ на графі описується формулою

$$L_{RE\mu} = L_{SET} - \sum_{j=1}^{S_i} \Delta L_{ij} \cdot (1 - p_{ijm}),$$

де $L_{RE\mu}$ – реальний ресурс, років; L_{SET} – призначений ресурс, років.

Запропоновано у разі стохастичної зміни ресурсу окремого вузлу трансформатора застосувати апарат алгебри нечітких чисел. Так, значення змінних L_{TOj} , ΔL_{ij} , L'_{TOj} і p_{ijm} представлені нечіткими числами $L-R$ типу:

$$\begin{aligned} & \tilde{L}_{TOj} \{L_{TOj}, L_{TOjL}, L_{TOjR}\}, \Delta \tilde{L}_{ij} \{L_{ij}, L_{ijL}, L_{ijR}\}; \\ & \Delta \tilde{L}'_{TOj} \{L'_{TOj}, L'_{TOjL}, L'_{TOjR}\}, \tilde{p}_{ijm} \{p_{ijm}, p_{ijmL}, p_{ijmR}\}. \end{aligned}$$

Зміна ресурсу в ході виконання технологічної операції отримується з виразу

$$\begin{aligned} & \tilde{L}'_{TOj} \{L'_{TOj}, L'_{TOjL}, L'_{TOjR}\} = \tilde{L}_{TOj} \{L_{TOj}, L_{TOjL}, L_{TOjR}\} - \\ & - (\Delta \tilde{L}_{ij} \{L_{ij}, L_{ijL}, L_{ijR}\} \cdot (1 - \tilde{p}_{ijm} \{p_{ijm}, p_{ijmL}, p_{ijmR}\})), \end{aligned}$$

де $(1 - \tilde{p}_{ijm} \{p_{ijm}, p_{ijmL}, p_{ijmR}\}) = \{1 - p_{ijm}; 0 + p_{ijmL}; 0 + p_{ijmR}\}$ за правилами арифметичних дій з нечіткими числами $L-R$ типу. Зменшення ресурсу в ході всього технологічного процесу за шляхом μ на графі

$$\begin{aligned} & \tilde{L}_{RE\mu} \{L_{RE\mu}, L_{RE\mu L}, L_{RE\mu R}\} = \tilde{L}_{SET} \{L_{SET}, L_{SETL}, L_{SETR}\} - \\ & - \sum_{j=1}^{S_i} \Delta \tilde{L}_{ij} \{L_{ij}, L_{ijL}, L_{ijR}\} \times (1 - \tilde{p}_{ijm} \{p_{ijm}, p_{ijmL}, p_{ijmR}\}). \end{aligned}$$

де $\tilde{L}_{RE\mu} \{L_{RE\mu}, L_{RE\mu L}, L_{RE\mu R}\}$ – реальний ресурс, виражений через нечітке число $L-R$ типу, років; $\tilde{L}_{SET} \{L_{SET}, L_{SETL}, L_{SETR}\}$ – призначений ресурс, виражений через нечітке число $L-R$ типу, років.

З огляду на ймовірнісний характер вихідних даних для описаного вище алгоритму, такі дані можуть бути отримані експертним шляхом.

Модель витрати ресурсу целюлозної ізоляції трансформатора на етапі його експлуатації має структуру, наведену на рис. 2 і складається з наступних підмоделей:

1. Модель факторів експлуатації (ФЕ) формує прогнозовані графіки струму навантаження I_d і температури охолодного середовища θ_a .

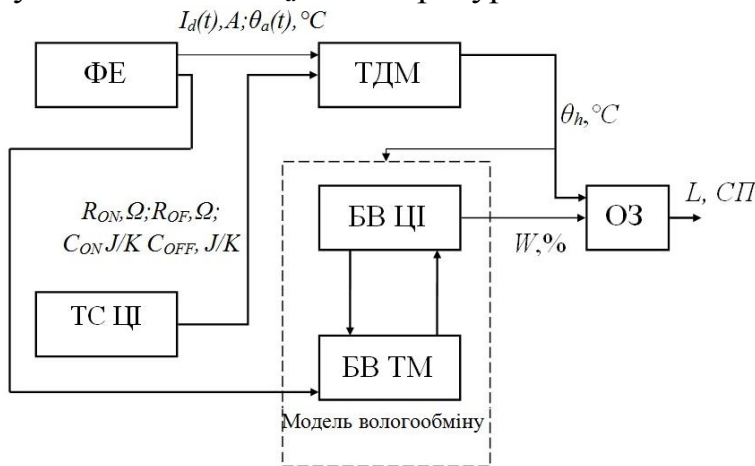


Рисунок 2 – Структурна схема моделі скорочення строку служби целюлозної ізоляції під час експлуатації

2. Модель технічного стану целюлозної ізоляції та трансформаторного масла (ТС Ц) формує значення теплоємності та теплового опору для різних видів охолодження, а також графік зміни кислотності трансформаторного масла.

3. Термодинамічна модель (ТДМ) формує прогнозований графік температури найбільш нагрітої точки θ_h як функції від I_d і θ_a .

4. Модель вологообміну

моделює динаміку вологості в системі целюлозна ізоляція – трансформаторне масло в залежності від теплового режиму трансформатора.

5. Блок оцінки зносу ОЗ виконує розрахунок значення відносного скорочення строку служби ізоляції L та зменшення її ступеню полімеризації.

Рівень деталізації підмоделей, що входять до моделі витрати ресурсу, залежить від вимог до точності прогнозування та доступного обсягу вихідних даних. У якості моделі вологообміну запропонована модель, структурна схема якої наведена на рис. 3. Модель являє собою діаграму станів (Statechart Diagram), переходи між якими здійснюються з урахуванням співвідношень між парціальними тисками парів води в целюлозній ізоляції (p_{paper}) і трансформаторному маслі (p_{oil}), і є удосконаленням відомого розрахункового методу визначення вологості целюлозної ізоляції за вологістю трансформаторного масла.

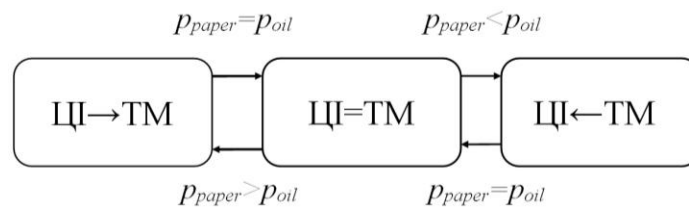


Рисунок 3 – Структурна схема моделі динаміки вологості

У кожному стані моделі виконується відповідна дія. Так, ЦІ→ТМ – стан, який характеризує перенос вологи з целюлозної ізоляції в трансформаторне масло. Кількість вологи, яка мігрує з целюлозної ізоляції в трансформаторне масло, за період часу dt при зміні значення температури найбільш нагрітої точки визначається диференціальним рівнянням

$$\frac{dW_{paper}}{dt} = \frac{W_{c.paper}(\theta_{h1}) - W_{paper}(\theta_{h2})}{\tau}, \quad (1)$$

де $W_{c.paper}(\theta_{h1})$ – вологість целюлозної ізоляції W_c при температурі найбільш нагрітої точки θ_{h1} , % від маси целюлозної ізоляції; $W_{paper}(\theta_{h2})$ – вологість целюлозної ізоляції W_c при температурі найбільш нагрітої точки θ_{h2} , % від маси целюлозної ізоляції, τ – постійна часу перенесення вологи;

Зміна ступеня зволоженості трансформаторного масла в результаті міграції вологи з целюлозної ізоляції

$$\frac{dW_{oil}}{dt} = \frac{W_{c.oil}(\theta_{h1}) + \frac{W_{paper} \cdot m_{oil}}{m_{paper}}}{\tau}, \quad (2)$$

де $W_{c.oil}(\theta_{h1})$ – вологість трансформаторного масла при температурі найбільш нагрітої точки θ_{h1} , % від маси целюлозної ізоляції; m_{oil} – загальна маса масла в трансформаторі, т; m_{paper} – загальна маса целюлозної ізоляції в трансформаторі, т.

Зміна ступеню зволоженості у стані ЦІ←ТМ описується виразами аналогічними (1 – 2).

ЦІ = ТМ – рівноважний стан, до якого система прагне за однакової температури целюлозної ізоляції, трансформаторного масла і охолодного середовища. Динаміка приросту вологості у целюлозній ізоляції та трансформаторному

маслі під час експлуатації:

$$\frac{dm_{oil}}{dt} = k_{oil}, \quad \frac{dm_{paper}}{dt} = k_{paper},$$

де k_{oil} , k_{paper} - коефіцієнти, що характеризують підвищення вологості целюлозної ізоляції і трансформаторного масла, відповідно, г/кг·годину; m_{oil} , m_{paper} – маса вологи в целюлозній ізоляції та трансформаторному маслі, відповідно, кг.

Верифікацію моделі здійснено шляхом порівняння результатів моделювання з даними моніторингу, яке показало достатній збіг (в межах 10 %).

Модель технічного стану целюлозної ізоляції розглядається як частина *когнітивної системи управління життєвим циклом трансформатора*. Схема функціональної структури такої системи наведена на рис. 4. До функцій когнітивної системи управління входить отримання знань, їх когнітивна обробка і формування впливів на об'єкт управління.

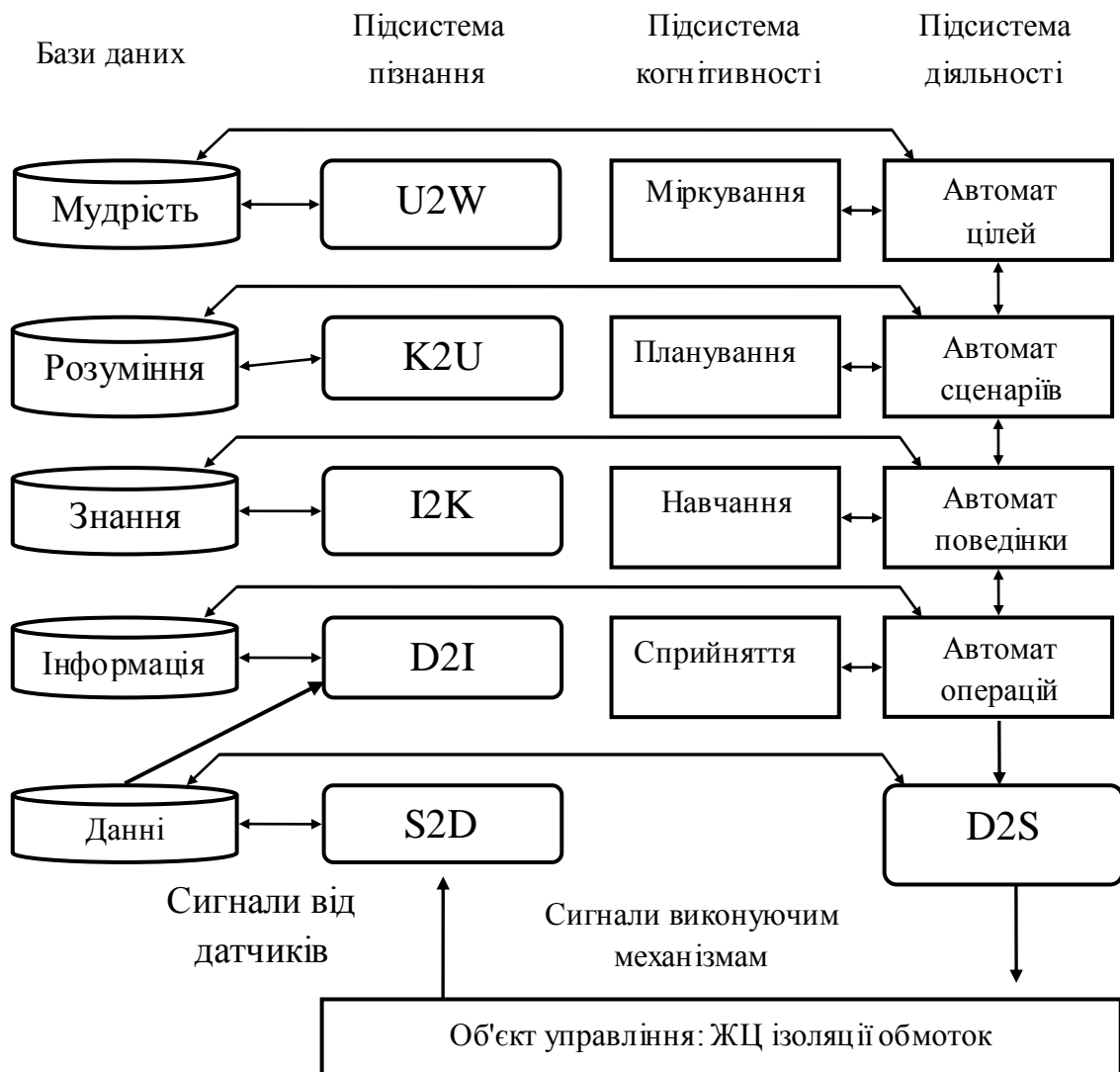


Рисунок 4 – Структурна схема функціональної структури КСУ життєвого циклу целюлозної ізоляції силового трансформатора

Форми знань що використовуються в когнітивних системах управління описуються пірамідами форм знань DIKW або DIKUW (Data (Дані) – Information (Інформація) – Knowledge (Знання) – Understanding (Розуміння) – Wisdom (Мудрість); форми діяльності – пірамідою TSBOD (Target (Мета) – Scenario (Сценарій) – Behavior (Поведінка) – Operation (Операція) – Data (Дані)). Таким чином, описаний комплекс з моделей формування та витрати ресурсу целюлозної ізоляції дозволяють більш точно спрогнозувати зміну технічного стану силового трансформатора впродовж періоду його експлуатації.

Третій розділ присвячений вирішенню задачі вибору параметрів розробленої комплексної моделі технічного стану целюлозної ізоляції та її дослідженню. У якості максимально деталізованої моделі зміни струму навантаження I_d використовується модель

$$I_d = P_y \cdot I_{yav} \cdot N_y + \Delta I_{dy} \cdot P_y(N_{dy}) + \Delta I_{dd} \cdot P_d(N_d) + \Delta I_{dh} \cdot P_h(N_h) + \Delta I_{di} \cdot K_i(N_i),$$

де P_y – коефіцієнт зміни середньорічного струму; I_{yav} – середньорічний струм навантаження на момент прогнозу; N_y – номер річного інтервалу прогнозу; ΔI_{dy} – середньорічна зміна струму навантаження; $P_y(N_{dy})$ – коефіцієнт середньодобових змін; ΔI_{dd} – середньодобові зміни струму навантаження; $P_d(N_d)$ – коефіцієнт залежності від дня тижня; N_d – номер дня в тижні; ΔI_{dh} – середньогодинна зміна струму навантаження; $P_h(N_h)$ – коефіцієнт, що залежить від номера години; ΔI_{di} – амплітуда кидка струму навантаження; K_i – інтервал кидка струму навантаження; N_i – номер інтервалу кидка струму навантаження.

При моделюванні I_d величини коефіцієнтів P_y , ΔI_{di} та K_i є випадковими величинами. У зв'язку з великою тривалістю інтервалу прогнозу та великою кількістю факторів, що впливають на значення конкретного параметра, будемо вважати ці значення випадкових величин підпорядкованими випадковому нормальному закону розподілу, який характеризується густиною розподілу

$$f(P_y, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(P_y - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}},$$

де μ – математичне очікування (середнє значення коефіцієнту P_y); σ – середньоквадратичне відхилення.

Для вирішення математичних задач, шукані величини яких являють собою ймовірнісні характеристики деякого випадкового явища, використано метод статистичного моделювання Монте – Карло.

Для визначення оптимальної кількості експериментів сформовано вісім масивів псевдовипадкових чисел обсягом 50, 75, 100, 125, 150, 500, 750 та 1000 значень. Генерація псевдовипадкових значень та побудова графіку густини ймовірності здійснена за допомогою функцій «Генерація випадкових чисел» та «Гістограма» з пакету Analysis Tool Pack програми Microsoft Excel ® 2007.

На рис. 5 наведений графік густини ймовірності розподілу коефіцієнту зміни середньорічного струму навантаження для вибірки P_y об'ємом 1000 значень з характеристиками розподілу $\mu = 2$, $\sigma = 0,5$.

Для генерованих випадкових значень параметрів моделі факторів експлуатації визначені статистичні показники та виконано моделювання скорочення строку служби целюлозної ізоляції. В результаті моделювання отримано M значень відносного скорочення строку служби L , для яких також визначені статистичні показники.

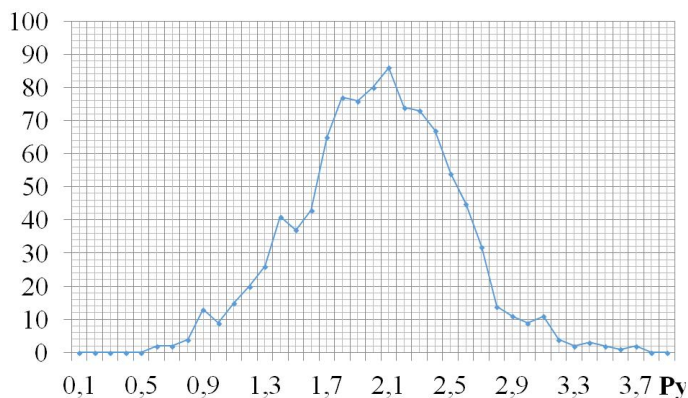


Рисунок 5 – Графік густини ймовірності розподілу генерованої величини 1000 значень

вість дозволяє оцінити мінімальну кількість експериментів Карло – близько 200.

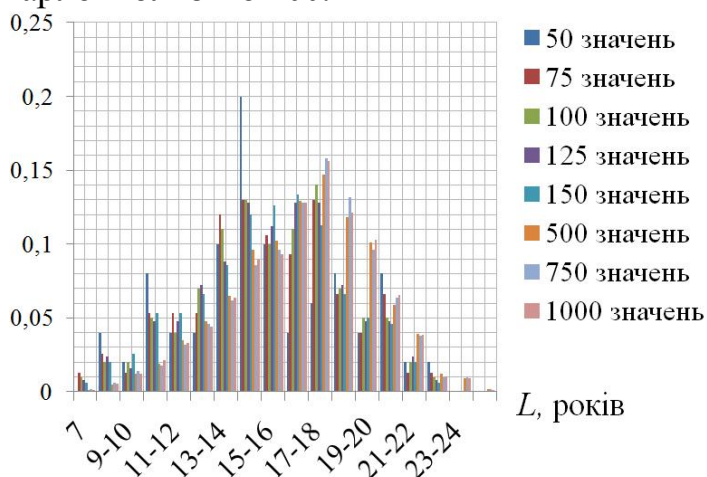


Рисунок 6 – Графік густини розподілу L целюлозної ізоляції силового трансформатора, побудований за результатами моделювання

На рис. 6 наведено графік густини розподілу L целюлозної ізоляції силового трансформатора, побудований за результатами моделювання для масивів генерованої величини від 50 до 1000 значень. При збільшенні кількості експериментів функції на рис. 6 стають більш "гладкими", а зміни значення ймовірності зносу для обраного інтервалу зносу зменшуються. Зазначена властивість експериментів за методом Монте-

Для використання при моделюванні скорочення строку служби ізоляції запропонована спрощена модель теплових процесів, визначення параметрів якої (теплоємність трансформатора C_M і теплові опори для різних видів охолодження R_l) може здійснюватися за результатами теплових випробувань силового трансформатора.

Розрахунок зміни температури верхніх шарів трансформаторного масла виконується шляхом вирішення рівняння балансу енергій

$$C_M \theta_o' = (I_d^2 Z + P_{xx}) - (\theta_o - \theta_a) / R_l,$$

де C_M – теплоємність трансформатора; θ_o' – похідна температури верхніх шарів трансформаторного масла, °C; Z – повний опір обмотки, Ом; P_{xx} – потужність втрат холостого ходу трансформатора, Вт; θ_o – температура верхніх шарів трансформаторного масла, °C; R_l – тепловий опір трансформатора, Ом.

Розрахунок поточних значень теплоємності C_M теплового опору R_l виконується за допомогою виразів:

$$R_l = \frac{(\theta_{o2} - \theta_{a2})\theta_{o1}' - (\theta_{o1} - \theta_{a1})\theta_{o2}'}{\theta_{o1}'(I_{d2}^2 Z + P_{xx}) - \theta_{o2}'(I_{d1}^2 Z + P_{xx})};$$

$$C_M = \frac{(\theta_{o1} - \theta_{a1}) \cdot (I_2^2 Z + P_{xx}) - (\theta_{o2} - \theta_{a2}) \cdot (I_1^2 Z + P_{xx})}{(\theta_{o1} - \theta_{a1}) \cdot \theta_{o2}' - (\theta_{o2} - \theta_{a2}) \cdot \theta_{o1}'},$$

де θ_{o1}' , θ_{o1} , I_{d1} , θ_{a1} - похідна температури верхніх шарів масла, температура верхніх шарів масла, струм навантаження і температура охолодного середовища, відповідно, в момент часу Δt ; θ_{o2}' , θ_{o2} , I_{d2} , θ_{a2} - похідна температури верхніх шарів масла, температура верхніх шарів масла, струм навантаження і температура охолодного середовища, відповідно, в поточний момент часу t .

Модель оцінки зносу використовує для розрахунку відому формулу інтегралу старіння. Залежність швидкості старіння від значення вологості виводиться в відомих роботах на основі двох точок, значенню вологості целюлозної ізоляції $W = 0,3\%$ відповідає значення швидкості зносу $V_W = 1$, при $W = 1,0\%$ швидкість зносу збільшується у 6 разів, тобто $V_W = 6$. Зокрема, ці значення використовуються для апроксимації вихідних даних за допомогою відомої степеневі функції від часу t

$$V_W = \left(\frac{W(t)}{W_{\text{БАЗ}}} \right)^{1,493}, \quad (3)$$

де V_W - відносна швидкість старіння ізоляції, що залежить від ступеня зволоженості паперу $W(t)$, $W_{\text{БАЗ}}$ - поточний і базовий показник вмісту вологи целюлозної ізоляції, % від маси целюлозної ізоляції.

Недоліком формули (3) є те, що значення апроксимації, отримані в одному інтервалі, використовуються для обчислень поза цим інтервалом. З проведених розрахунків за допомогою інтегралу старіння видно, що при підвищенні значення W за незмінних значеннях інших вихідних даних пропорційне відношення V_W к V_θ і V_K різко зростає. При $W = 5\%$ значення V_W перевищує значення V_K в 29,12 разів, а значення V_θ в 33,35 разів. Для коригування залежності швидкості старіння від вологості паперу застосовуються уточнені дані (табл. 1), отримані з довідкової літератури. Дані табл. 1 для значень швидкості старіння апроксимовані за допомогою експоненційної, степеневі, лінійної, логарифмічної функцій.

Таблиця 1 – Вхідні дані для апроксимації залежності швидкості старіння від зволоженості целюлозної ізоляції

Вологість W , %	Діапазон оцінок старіння	Середнє значення
0,3	1	1
1,0	6 – 16	11
4,0	12 – 45	28,5

Найбільше значення величини вірогідності апроксимації R отримано при використанні логарифмічної функції

$$V_W = 10,66 \ln(W(t)) + 12,85. \quad (4)$$

Виконаний вибір коефіцієнтів запропонованої логарифмічної функції. В табл. 2 наведені результати розрахунку швидкості старіння V_W для виразу (4) для різних коефіцієнтів, обраних за допомогою методу перебору. В дужках наведені значення відхилення отриманих результатів від експериментальних даних табл. 1 в %.

Таблиця 2 – Налаштування коефіцієнтів виразу (4)

Функція	Швидкість старіння, V_W		
	0,3	1	4
$V_W = 10,66 \ln(W(t)) + 12,85$	0,0156 (98,43 %)	12,85 (16,81 %)	27,62 (3,06 %)
$V_W = 10,16 \ln(W(t)) + 12,35$	0,1176 (88,23 %)	12,35 (12,27 %)	26,43 (7,24 %)
$V_W = 9,66 \ln(W(t)) + 11,85$	0,2196 (78 %)	11,85 (7,7 %)	25,24 (11,43 %)
$V_W = 8,66 \ln(W(t)) + 10,85$	0,4236 (57,64 %)	10,85 (1,36 %)	22,85 (19,8 %)

Як видно з табл. 2, для значень W (0,3 % та 1 %) найменше значення похибки може бути отримано за допомогою виразу

$$V_W = 8,66 \ln(Wt) + 10,85.$$

Для значень вологості паперової ізоляції $W \geq 4$ % використано вираз (4). Принята формула інтеграла старіння, яка має вигляд

$$L(t_0, t_0 + T) = \begin{cases} \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \left(\frac{K}{K_{\text{БАЗ}}} \right)^{2,05} \cdot (8,66 \ln(Wt) + 10,85) \times \\ \times \exp \left[\ln 2 \cdot \frac{(\theta_h - 98)}{\Delta} \right] dt \text{ за } 0,2\% \leq W \leq 3\%; \\ \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \left(\frac{K}{K_{\text{БАЗ}}} \right)^{2,05} \cdot (10,66 \ln(W_t) + 12,85) \times \\ \times \exp \left[\ln 2 \cdot \frac{(\theta_h - 98)}{\Delta} \right] dt \text{ за } W \geq 4\%, \end{cases}$$

де $L(t_0, t_0 + T)$ – знос целюлозної ізоляції в інтервалі часу, який починається в момент t_0 тривалістю T ; K , $K_{\text{БАЗ}}$ – поточний і базовий показник кислотності масла, виражений в мг КОН/г, відповідно.

Модель технічного стану целюлозної ізоляції силового трансформатора на етапі експлуатації реалізована в середовищі Matlab Simulink ® 7.7.0. Моделювання виконується з використанням функцій ode23 і ode45, які призначені для чисельного інтегрування систем звичайних диференціальних рівнянь і реалізують методи Рунге–Кутта 4-го та 5-го порядків. В якості об'єкту моделювання обрано однофазний автотрансформатор типу АОДЦТН-167000/500/220. Для оцінки відносного скорочення строку служби целюлозної ізоляції трансформатора протягом наступних 10 років експлуатації виконано моделювання для випадків впливу теплового старіння окремо та сумісно з гідролізом. На рис. 7 наведені графіки W та V_W , графік зміни ступеню полімеризації та константи швидкості

реакції K . Базовий показник вологовмісту целюлозної ізоляції $W_{\text{БАЗ}}$ дорівнює 0,3 %, що відповідає сухій ізоляції. Впродовж періоду моделювання поточне значення вологовмісту W зростає до 2 %. При заданих умовах експлуатації за 10 років при урахуванні гідролізу та піролізу відносне скорочення строку служби, отримане в результаті моделювання, буде становити приблизно 15 років. Значення ступеню полімеризації зменшиться на 175,4 одиниці з 950.

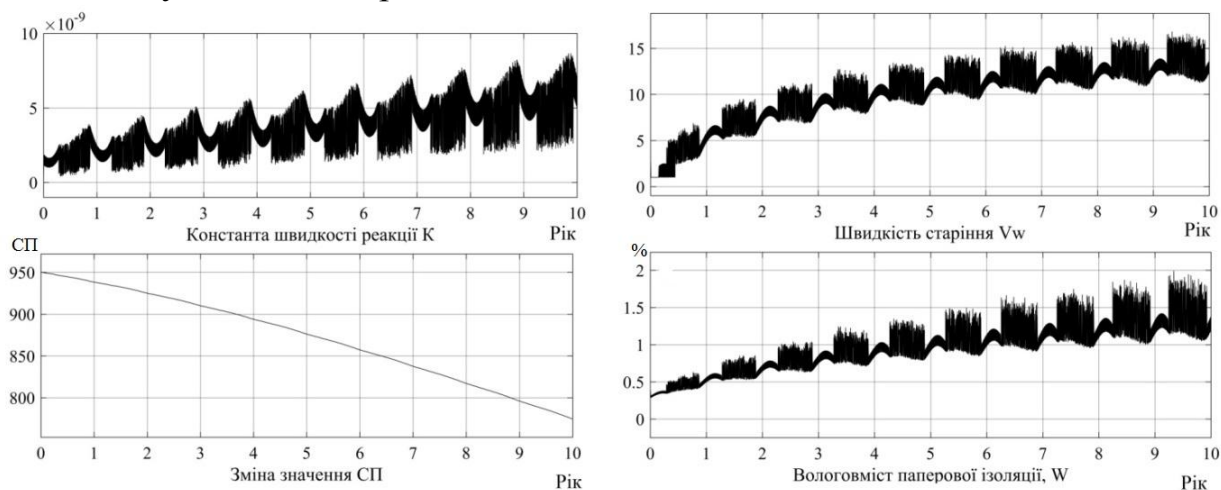


Рисунок 7 – Графіки зміни параметрів трансформатора, отримані в результаті моделювання 10 років експлуатації з урахуванням гідролізу

В четвертому розділі вирішується задача практичної реалізації розробленої комплексної моделі та розробки системи техніко-економічного обґрунтування вибору стратегії і періодичності технічного обслуговування ізоляції трансформатора. З точки зору моделювання витрати ресурсу целюлозної ізоляції наслідком проведення її технічного обслуговування (зокрема, сушіння активної частини трансформатора в експлуатації) є зменшення вмісту вологи ізоляції, а також підвищення швидкості старіння целюлозної ізоляції внаслідок дії температури, за якої відбувається сушіння. Основною метою роботи системи є вибір оптимальної періодичності проведення технічного обслуговування целюлозної ізоляції та розрахунок загальних витрат на експлуатацію трансформатора для обраної періодичності технічного обслуговування. З використанням наведених моделей технічного стану целюлозної ізоляції виконано моделювання витрати ресурсу ізоляції трансформатора із застосуванням різних стратегій технічного обслуговування і умов експлуатації трансформатора. На рис. 8 та 9 наведені графіки зміни ступеня полімеризації целюлози протягом 30 років експлуатації трансформатора для наступних випадків:

- планово-попереджувальна стратегія технічного обслуговування, низький вміст вологи в ізоляції;
- планово-попереджувальна стратегія технічного обслуговування, високий вміст вологи в ізоляції;
- стратегія обслуговування за станом, низький вміст вологи в ізоляції;
- стратегія обслуговування за станом, високий вміст вологи в ізоляції.

В табл. 3 наведені отримані результати моделювання витрати ресурсу целюлозної ізоляції для різних стратегій технічного обслуговування, $W_{\text{кр}} = 4$ %. З таблиці

видно, що найменше значення витраченого ресурсу (найбільше фінальне значення ступеню полімеризації) отримано при моделюванні стратегії технічного обслуговування за станом за умови сухої ізоляції.

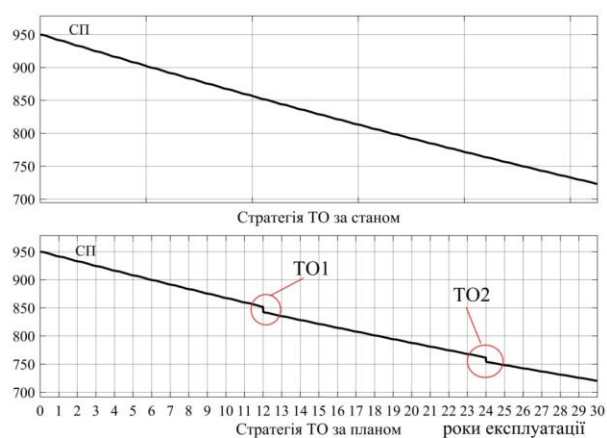


Рисунок 8 – Ізоляція I класу вологовмісту

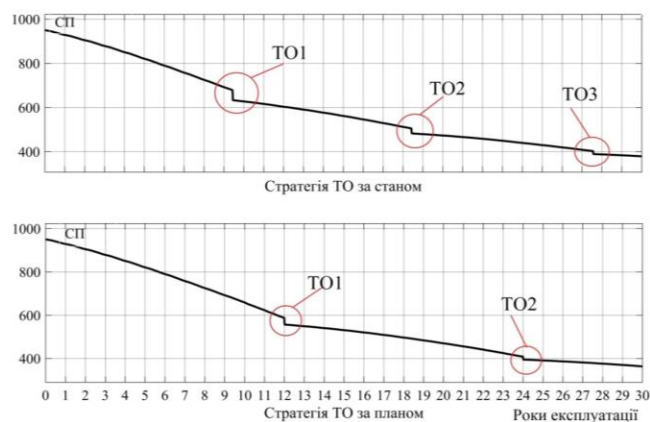


Рисунок 9 – Зволожена ізоляція

Таблиця 3 – Результати моделювання витрати ресурсу целюлозної ізоляції

Стратегія технічного обслуговування	Значення ступеню полімеризації, отримане в результаті моделювання	Кількість днів $W \geq W_{кр}$
Технічне обслуговування за станом, суха целюлозна ізоляція	768	0
Технічне обслуговування за планом, суха целюлозна ізоляція	720	0
Технічне обслуговування за станом, зволожена целюлозна ізоляція	395	0
Технічне обслуговування за планом, зволожена целюлозна ізоляція	363	158

Отримані результати демонструють можливість застосування запропонованих моделей для вирішення задачі оптимального планування стратегії технічного обслуговування трансформатора. Розроблена програма WOPTWI (Wearing Out Of Power Transformer Winding Insulation) реалізована в середовищі Matlab Simulink ® 7.7.0 і призначена для автоматизованого розрахунку прогнозованої витрати ресурсу на різних стадіях життєвого циклу силового трансформатора. Інтерфейс користувача (рис. 10) побудований в середовищі Matlab GUIDE, призначеному для створення додатків з графічним інтерфейсом користувача.

На стадії експлуатації застосування програми WOPTWI дозволяє оптимізувати стратегію технічного обслуговування, що включає такі операції, як регенерація масла і сушіння целюлозної ізоляції. При цьому додаткові витрати на збільшення обсягу технічного обслуговування можуть бути компенсовані капіталізацією приросту залишкового ресурсу силового трансформатора.

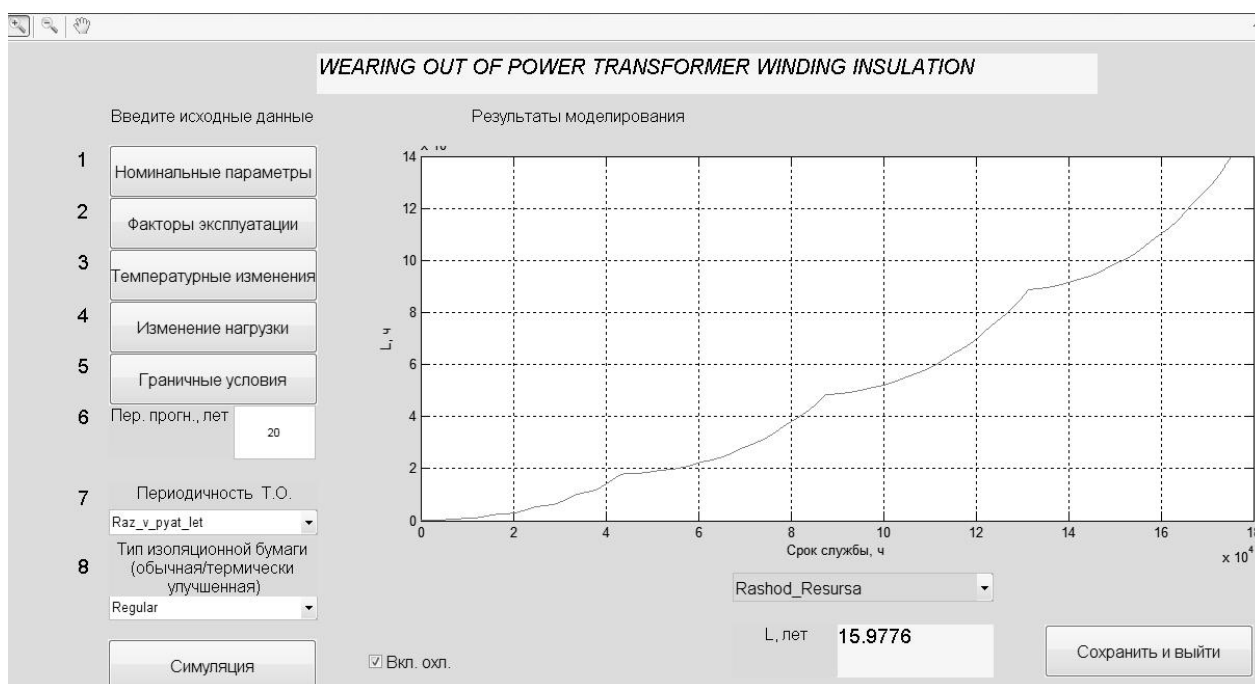


Рисунок 10 – Основне вікно програми WOPTWI (Wearing Out Of Power Transformer Winding Insulation)

Застосування розробленої програми дозволяє спрогнозувати тенденцію витрачання ресурсу целюлозної ізоляції одиничного трансформатора при різних умовах експлуатації і обсягах технічного обслуговування.

У **додатках** наведено акти впровадження результатів дисертаційної роботи в Українському науково-дослідному, проектно-конструкторському та технологічному інституті трансформаторобудування ПАТ "ВІТ" і в навчальний процес у Запорізькому національному технічному університеті, довідка про можливість впровадження результатів дисертаційної роботи при модернізації системи неперервного контролю SAFE-T (виробництва ТОВ «Енергоавтоматизація») силового трансформатора ТРДНС-40000/35-УХЛ 1, список публікацій здобувача за темою дисертації, а також реалізація моделі технічного стану целюлозної ізоляції в програмному середовищі Matlab Simulink ® 7.7.0.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу удосконалення математичних моделей для прогнозування технічного стану целюлозної ізоляції силових трансформаторів шляхом розробки комплексної моделі технічного стану целюлозної ізоляції. Основні наукові й практичні результати, отримані в роботі, полягають у наступному:

1. Виконано аналіз розрахункових методів та моделей визначення ресурсних характеристик целюлозної ізоляції силових маслонаповнених трансформаторів, що дозволило встановити шляхи удосконалення цих методів та моделей.

2. Розроблені математичні моделі для оцінки впливу етапу виробництва на призначений ресурс, які відрізняються урахуванням недосконалості засобів контролю і стохастичності процесу зміни ресурсу в ході технологічного процесу. При

вирішенні задачі розробки моделей технологічної та контрольної операції був застосований апарат алгебри нечітких чисел. Використання зазначених моделей дозволяє підвищити точність розрахунку залишкового ресурсу трансформатора шляхом урахування зменшення призначеного ресурсу через внесення дефектів на етапі виробництва.

3. Розроблено математичну модель технічного стану целюлозної ізоляції силового трансформатора на етапі експлуатації, яка складається з моделей факторів експлуатації, теплових процесів, вологообміну в системі паперова ізоляція – трансформаторне масло та блоку оцінки зносу. Урахування динаміки вмісту вологи в ізоляції дозволяє підвищити точність оцінки ресурсу ізоляції трансформатора. Запропонована модель вологообміну дозволяє будувати прогнозований графік вологості целюлозної ізоляції за даними моніторингу одиничного трансформатора або за результатами моделювання зміни експлуатаційних параметрів трансформатора.

4. Запропонована система техніко-економічного обґрунтування вибору стратегії технічного обслуговування ізоляції трансформатора на стадії його експлуатації. Проведено аналіз впливу проведення технічного обслуговування силового трансформатора (зокрема, сушіння активної частини) на ресурсні характеристики целюлозної ізоляції. Виконано моделювання витрати ресурсу трансформатора для різних стратегій технічного обслуговування. За допомогою аналізу результатів моделювання обґрунтована необхідність урахування технічного обслуговування (зокрема, сушіння ізоляції) при розрахунках залишкового ресурсу ізоляції в експлуатації.

5. Здійснено вибір параметрів розробленої комплексної моделі технічного стану целюлозної ізоляції. Дістав розвитку розрахунковий метод визначення скорочення строку служби ізоляції за рахунок корегування відомої формули інтегралу старіння шляхом більш точної інтерполяції вихідних даних, що використовуються для побудови залежності швидкості старіння від вмісту вологи в ізоляції. Урахування стохастичного характеру змінення факторів експлуатації трансформатора здійснено за допомогою методу Монте – Карло. Розроблені моделі реалізовані у вигляді програми в середовищі Matlab Simulink ® 7.7.0. Результати досліджень впроваджено в Українському науково-дослідному, проектно-конструкторському та технологічному інституті трансформаторобудування ПАТ "ВІТ" (м. Запоріжжя) та в навчальний процес кафедри електричних та електронних апаратів Запорізького національного технічного університету.

Отримані результати можна рекомендувати для використання на підприємствах та установах України, що займаються проектуванням силових маслонаповнених трансформаторів та розробкою систем неперервного контролю силових трансформаторів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Василевский В.В. Моделирование динамики распределений дефектов в изделиях в ходе технологического процесса / М.А. Поляков, В.В. Василевский // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – 2013. – №4(87). – С.73 – 81.

Здобувач програмно реалізував ймовірнісні моделі технологічної та контрольної операції.

2. Василевский В.В. Оценка остаточного ресурса изоляции на основе учета индивидуальных особенностей жизненного цикла силового трансформатора / М.А. Поляков, В.В. Василевский // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2014. – №3. – С.33 – 36.

Здобувач прийняв участь у розробці методики оцінки залишкового ресурсу ізоляції силового трансформатора шляхом імітаційного моделювання прогнозованих результатів впливів зовнішніх факторів на стан ізоляції.

3. Vasilevskij V.V. Prognosis of wearing out of power transformer winding insulation / V.V. Vasilevskij, M.A. Polyakov // *Технічна електродинаміка*. – 2014. – №5. – С.65 – 67.

Здобувачем виконано статистичне моделювання зміни факторів експлуатації силового трансформатора в періоді прогнозу за допомогою методу Монте – Карло.

4. Василевский В.В. Оценка расхода ресурса бумажной изоляции силового маслонаполненного трансформатора с помощью уточненной формулы интеграла старения / В.В. Василевский // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2015. – №1. – С.18 – 21.

5. Василевский В.В. Автоматизация оценки ресурса бумажной изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов на разных стадиях жизненного цикла / В.В. Василевский, М.А. Поляков // *Електромеханічні та енергозберігаючі системи*. – 2015. – №3. – С.110 – 116.

Здобувачем розроблена програма для автоматизації розрахунків прогнозованих ресурсних характеристик целюлозної ізоляції силових трансформаторів.

6. Василевский В.В. Модель динамики влажности в системе "Бумажная изоляция – Трансформаторное масло" в нестационарных тепловых режимах силового трансформатора/ В.В. Василевский // *Електротехніка і електромеханіка*. – Харків : НТУ "ХП", 2016. – №13, – С.17 – 20.

7. Василевский В.В. Модели влияния технологических и контрольных операций изготовления на реальный ресурс силового трансформатора / В.В. Василевский // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. – 2017. – №25 (101) – С.425 – 431.

8. Василевский В.В. Когнитивное управление жизненным циклом изоляции обмоток маслонаполненного силового трансформатора / М.А. Поляков, И.А. Андрияс, С.П. Конограй, В.В. Василевский // *Вісник Національного технічного університету "ХП"*. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. –2018. –№ 5. – С. 90-96.

Здобувач провів аналіз структури існуючих систем управління життєвим циклом ізоляції обмоток силових трансформаторів.

9. Василевский В.В. Определение границ оптимальности технологических процессов изготовления / М.А. Поляков, В.В. Василевский // *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО–2013: Матеріали 4-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції*. – Херсон : ХДМА, 2013, – С. 276 – 278.

Здобувачем досліджено методики визначення границь оптимальності технологічних процесів виготовлення.

10. Василевский В.В. Моделирование динамики процессов миграции влаги в бумажно-масляной изоляции силового трансформатора / В.В. Василевский //

Тиждень науки 2014: Збірник тез доповідей щорічної науково-практичної конференції серед викладачів, науковців, молодих учених, аспірантів і студентів ЗНТУ. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2014, – С. 227.

11. Василевский В.В. Автоматизация формирования тренда влажности бумажной изоляции силового маслонаполненного трансформатора / В.В. Василевский // Тиждень науки 2015: Збірник тез доповідей щорічної науково-практичної конференції серед викладачів, науковців, молодих учених, аспірантів і студентів ЗНТУ. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2015, – С. 81.

12. Василевский В.В. Разработка технико-экономической модели обновления ресурса бумажной масляной изоляции силовых трансформаторов / В.В. Василевский // Тиждень науки 2016: Збірник тез доповідей щорічної науково-практичної конференції серед викладачів, науковців, молодих учених, аспірантів і студентів ЗНТУ. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2016, – С. 380.

13. Василевский В.В. Прогнозування витрати ресурсу целюлозної ізоляції шляхом моделювання зменшення ступеню її полімеризації / В.В. Василевский // Тиждень науки 2018: Збірник тез доповідей щорічної науково-практичної конференції серед викладачів, науковців, молодих учених, аспірантів і студентів ЗНТУ. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2018, – С. 459.

АНОТАЦІЇ

Василевський В.В. Прогнозування строку служби силового трансформатора за допомогою комплексної моделі технічного стану целюлозної ізоляції. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – електричні машини й апарати. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2019 р.

Дисертацію присвячено удосконаленню математичних моделей для прогнозуванню залишкового ресурсу силового трансформатора та техніко-економічного обґрунтування стратегії його технічного обслуговування шляхом розробки комплексної моделі технічного стану целюлозної ізоляції.

Запропоновано комплексну модель технічного стану целюлозної ізоляції, яка складається з математичної моделі формування реального ресурсу трансформатора на етапі його виробництва та моделі витрати ресурсу целюлозної ізоляції силового трансформатора на етапі експлуатації. Розроблено математичну модель вологообміну в системі целюлозна ізоляція – трансформаторне масло у взаємозв'язку з іншими математичними моделями, які описують стан трансформатора в експлуатації. Проведено аналіз впливу проведення технічного обслуговування силового трансформатора (зокрема, сушіння активної частини) на ресурсні характеристики целюлозної ізоляції. Виконано моделювання витрати ресурсу трансформатора для різних стратегій технічного обслуговування. За допомогою аналізу результатів моделювання обґрунтовано необхідність урахування проведення технічного обслуговування при розрахунках залишкового ресурсу і моделюванні витрати ресурсу ізоляції в експлуатації. Отримав подальший розвиток розрахунковий метод визначення скорочення строку служби ізоляції за рахунок корегування відомої формули інтегралу старіння шляхом більш точної інтерполяції вихідних даних, що використовуються для побудови залежності швидкості старіння від вмісту вологи в ізоляції. Вперше запропоно-

вано математичні моделі для оцінки впливу етапу виробництва на призначений ресурс, які відрізняються урахуванням недосконалості засобів контролю і стохастичності процесу зміни ресурсу в ході технологічного процесу.

Ключові слова: моделювання, підвищений ресурс експлуатації, надійність, целюлозна ізоляція, силовий трансформатор, технічне обслуговування.

Василевский В.В. Прогнозирование срока службы силового трансформатора с помощью комплексной модели технического состояния целлюлозной изоляции. На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – электрические машины и аппараты. – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2019 г.

Диссертация посвящена совершенствованию математических моделей для прогнозирования остаточного ресурса силового трансформатора и технико-экономического обоснования стратегии его технического обслуживания путем разработки комплексной модели технического состояния целлюлозной изоляции. В работе проанализированы расчетные методы прогноза сокращения срока службы целлюлозной изоляции. Определено, что эти методы наряду с положительными качествами имеют и недостатки, связанные с недостаточным учетом изменения факторов эксплуатации трансформатора в периоде прогнозирования и влияния технического обслуживания на скорость старения изоляции. Предложена комплексная модель технического состояния целлюлозной изоляции, которая состоит из математической модели формирования реального ресурса трансформатора на этапе его производства и математической модели расхода ресурса целлюлозной изоляции силового трансформатора на этапе эксплуатации. Эта модель позволяет повысить точность оценки остаточного ресурса целлюлозной изоляции маслонаполненного трансформатора. Разработана математическая модель влагообмена в системе целлюлозная изоляция – трансформаторное масло во взаимосвязи с другими моделями, которые описывают состояние трансформатора в эксплуатации. Учет динамики содержания влаги в изоляции позволяет повысить точность оценки ресурса изоляции трансформатора. Предложенная модель позволяет строить прогнозируемый график влажности целлюлозной изоляции по данным мониторинга единичного трансформатора или по результатам моделирования изменения эксплуатационных параметров трансформатора. Проведен анализ влияния технического обслуживания силового трансформатора (в частности, сушки активной части) на ресурсные характеристики целлюлозной изоляции. Выполнено моделирование расхода ресурса трансформатора для различных стратегий технического обслуживания. С помощью анализа результатов моделирования обоснована необходимость учета проведения технического обслуживания при расчетах остаточного ресурса и моделировании расхода ресурса изоляции в эксплуатации.

Получил дальнейшее развитие расчетный метод определения сокращения срока службы изоляции за счет корректировки известной формулы интеграла старения путем более точной интерполяции исходных данных, используемых для построения зависимости скорости старения от содержания влаги в изоляции. Это позволило получить удовлетворительное совпадение результатов рас-

четов сокращения срока службы целлюлозной изоляции с экспериментальными данными. Впервые предложены математические модели для оценки влияния этапа производства на назначенный ресурс, которые отличаются учетом несовершенства средств контроля и стохастичности процесса изменения ресурса в ходе технологического процесса. Применение указанных моделей позволяет повысить точность расчета остаточного ресурса трансформатора путем учета уменьшения назначенного ресурса путем внесения дефектов на этапе производства. Результаты исследований внедрены в Украинском научно-исследовательском, проектно-конструкторском и технологическом институте трансформаторостроения ОАО "ВИТ" (г. Запорожье) при модернизации системы непрерывного контроля SAFE - Т разработки ООО "Енергоавтоматизация".

Ключевые слова: моделирование, повышенный ресурс эксплуатации, надежность, целлюлозная изоляция, силовой трансформатор, техническое обслуживание.

Vasilevsky V.V. Predicting the lifetime of the power transformer using a complex model of technical condition of cellulose insulation. Manuscript.

Thesis for granting the Degree of Candidate of Technical sciences in speciality 05.09.01 – Electric machines and apparatus. – National Technical University “Kharkiv Politechnical Institute”, 2019.

The thesis is dedicated to the improvement of mathematical models for forecasting the residual lifetime of a power transformer and the feasibility study of its maintenance strategy by developing a complex model of cellulose insulation technical condition. The complex model of the cellulose insulation technical condition, which consists of a mathematical model of the transformer's real resource formation at the stage of its production and a model of the resource consumption of the power transformer's cellulose insulation during the exploitation phase, is proposed. The mathematical model of water exchange in the system of cellulose insulation - transformer oil in the interrelation with other mathematical models, describing the condition of the transformer in exploitation is developed. The analysis of the effect of maintenance of power transformer (in particular, drying of the active part) on the characteristics of cellulose insulation is carried out. The transformer resource consumption modeling for different maintenance strategies is executed. The simulation justified the need to take into account the maintenance in the calculations of the residual resource and the modeling of the insulation resource consumption in operation. The calculation method for determining the reduction of insulation's lifetime was further developed by adjusting the known formula of the integral of aging by more accurate interpolation of the original data used to construct the dependence of the rate of aging on the moisture content of the insulation. For the first time, mathematical models for assessing the influence of the production stage on the assigned resource, which differ by the imperfection of control and stochasticity of the process of resource change during the technological process, are proposed.

Key words: modeling, increased exploitation life, reliability, cellulose insulation, power transformer, maintenance.



