

УДК 648.3.048.1

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ОЦЕНКИ РЕСУРСА БУМАЖНОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА**

**В. В. Василевский, М. А. Поляков**

Запорожский национальный технический университет  
ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, 69002, Украина. E-mail: Lisses@ukr.net

Актуальность автоматизации расчета прогнозируемых ресурсных характеристик бумажно-масляной изоляции обусловлена необходимостью обоснования принятия проектных и эксплуатационных решений на разных стадиях жизненного цикла трансформатора. Проведен анализ известных средств автоматизации оценки ресурса бумажно-масляной изоляции силовых трансформаторов. Предложена программа для автоматизации расчетов прогнозируемых ресурсных характеристик бумажно-масляной изоляции силовых трансформаторов, которая по прогнозируемым данным об условиях эксплуатации единичного силового трансформатора и его номинальным параметрам формирует тренды температуры охлаждающей среды, тока нагрузки, влагосодержания бумажной изоляции и кислотности масла. По этим трендам производится расчет температуры верхних слоев масла, температуры наиболее нагретой точки и израсходованного ресурса бумажно-масляной изоляции. Реализована возможность формирования тепловых параметров трансформатора по результатам тепловых испытаний. Выполнено моделирование динамики технического состояния системы охлаждения. Описан алгоритм работы с программой, приведен пример моделирования. Результаты моделирования представлены в виде графиков, иллюстрирующих динамику изменения основных параметров трансформатора в течение периода моделирования. Разработанная программа позволяет автоматизировать оценку остаточного ресурса бумажно-масляной изоляции в условиях изменяющихся внешних факторов эксплуатации.

**Ключевые слова:** бумажно-масляная изоляция, силовой трансформатор, компьютерная модель.

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ОЦІНКИ РЕСУРСУ ПАПЕРОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ПОТУЖНИХ ОЛИВОНАПОВНЕНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ НА РІЗНИХ СТАДІЯХ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ**

**В. В. Василевський, М. О. Поляков**

Запорізький національний технічний університет  
вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69002, Україна. E-mail: Lisses@ukr.net

Актуальність автоматизації розрахунку прогнозованих ресурсних характеристик паперово-масляної ізоляції обумовлена необхідністю обґрунтування прийняття проектних та експлуатаційних рішень на різних стадіях життєвого циклу трансформатора. Проведено аналіз відомих засобів автоматизації оцінки ресурсу паперово-оливної ізоляції потужних трансформаторів. Запропоновано програму для автоматизації розрахунків прогнозованих ресурсних характеристик паперово-оливної ізоляції, яка за прогнозованими даними об умовах експлуатації одиничного потужного трансформатора та його номінальним параметрам формує тренди температури охолоджуючої середовища, навантаження, змінення вологовмісту целюлози й лужності масла. За цими трендами виконується розрахунок температури верхніх шарів трансформаторного масла, найбільш нагрітої точки й витраченого ресурсу паперово-масляної ізоляції. Реалізовано можливість формування теплових параметрів трансформатора за результатами теплових випробувань. Виконано моделювання динаміки технічного стану системи охолодження. Результати моделювання надано у вигляді графіків, що ілюструють динаміку змінення основних параметрів трансформатора упродовж періоду моделювання. Описано алгоритм роботи з програмою, приведено приклад моделювання. Розроблена програма дозволяє автоматизувати оцінку залишкового ресурсу паперово-масляної ізоляції в умовах зміни зовнішніх факторів експлуатації.

**Ключові слова:** паперово-масляна ізоляція, потужний трансформатор, комп'ютерна модель.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Применительно к бумажно-масляной изоляции (БМИ) силовых трансформаторов (СТ) ресурс – время, в течение которого длина молекул целлюлозы с определенной степенью достоверности достигнет своего критического значения. На стадиях проектирования и изготовления БМИ происходит, соответственно, формирование потенциального и реального ресурсов, а на стадии эксплуатации – расход ресурса. При этом расчет вероятного остаточного ресурса является необходимым на всех стадиях жизненного цикла. Остаточный ресурс СТ практически совпадает с остаточным ресурсом его бумажной изоляции [1, 2].

Известен ряд программно-технических комплексов [3–7] для мониторинга трансформаторного оборудования, включающих в себя средства для оценки

ресурса БМИ. К достоинствам данных комплексов можно отнести возможность осуществлять онлайн мониторинг основных диагностических параметров СТ и некоторых эксплуатационных факторов [8], создавать базы данных измеренных и рассчитанных диагностических параметров с возможностью дальнейшей обработки и производить экспертную оценку остаточного ресурса на основании данных мониторинга. Кроме перечисленных положительных качеств эти средства имеют следующие недостатки:

- 1) применимость только к одной фазе жизненного цикла СТ (как правило, к фазе эксплуатации);
- 2) неполный учет факторов, влияющих на расход ресурса – как правило, учитывается только влияние температурного износа;

3) прогнозирование расхода ресурса базируется на данных мониторинга в предыдущие интервалы времени и не учитывает возможные изменения внешних факторов эксплуатации в будущем.

Целью работы является автоматизация оценки ресурса БМИ в условиях изменяющихся внешних факторов эксплуатации СТ с применением ранее разработанных моделей [9–11]. Для достижения этой цели разработана программа WOPTWI.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.**

Программа WOPTWI (рис. 1) предназначена для автоматизированного расчета прогнозируемых ресурсных характеристик БМИ на разных стадиях жизненного цикла СТ. Она реализует следующие функции:

- формирование тренда температуры охлаждающей среды по имеющимся данным о климатических условиях конкретного региона, в котором установлен трансформатор;
- формирование тренда тока нагрузки по имеющимся данным о нагрузке СТ в конкретном регионе;
- формирование трендов изменения влагосодержания бумажной изоляции и кислотности масла на основе экспертных данных;
- расчет ТННТ и температуры верхних слоев масла как функции нагрузки, температуры охлаждающей среды и режима охлаждения;
- формирование параметров термодинамической модели (тепловое сопротивление СТ и теплоемкость) по результатам тепловых испытаний;
- моделирование динамики технического состояния элементов системы охлаждения;

– расчет относительной скорости старения БМИ и израсходованного ресурса, базирующийся на уточненной формуле интеграла старения [9].

Предложенная программа может быть полезна проектантам, занимающимся разработкой новых или модернизацией существующих конструкций СТ для определенных условий работы. Например, в результате моделирования с использованием программы WOPTWI процессов старения изоляции может быть оценена правильность выбора в качестве изоляционного материала обмоток обычной или термически улучшенной бумаги (thermally upgraded paper [12]).

На стадии выбора трансформатора использование программы позволяет осуществить оптимальный выбор СТ с учетом предполагаемых изменяющихся условий эксплуатации, таких как прогнозируемые климатические условия и изменение нагрузок.

На стадии изготовления СТ моделирование процессов расхода изоляции с помощью программы WOPTWI может быть полезно специалистам-технологам для технико-экономического обоснования дополнительных контрольных операций. Так, может быть оценена необходимость дополнительных операций контроля качества сушки изоляции обмоток, т.к. отсутствие контроля приводит к повышению вероятности ускоренного износа более увлажненной БИ. В то же время выполнение контроля сопряжено с дополнительными затратами.

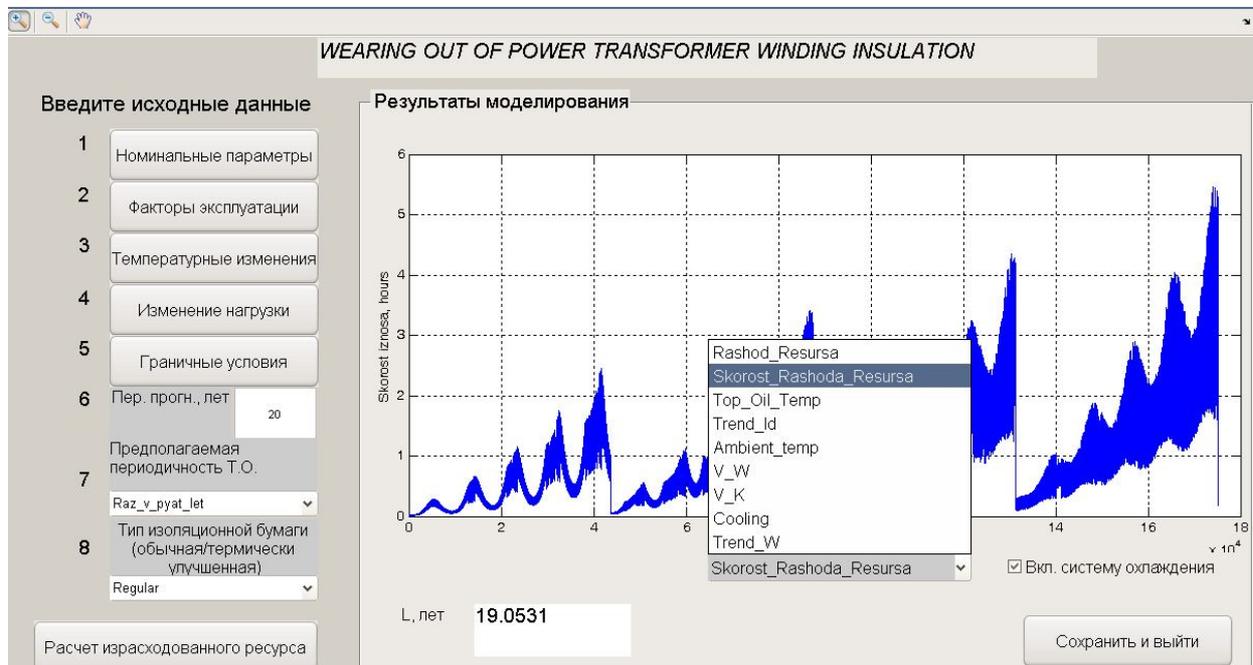


Рисунок 1 – Пример моделирования. Основное окно программы с выпадающим списком выбора графиков

На стадии эксплуатации применение программы WOPTWI позволяет оптимизировать стратегию технического обслуживания (ТО), включающего такие операции, как регенерация масла. При этом допол-

нительные затраты на увеличение объема ТО могут быть компенсированы капитализацией прироста остаточного ресурса СТ.

Применение разработанной программы позволяет спрогнозировать тенденцию расходования ресурса БМИ единичного трансформатора при разных условиях эксплуатации и объемах технического обслуживания.

*Математические модели.* В основе программы лежат следующие математические модели:

- модель тренда температуры верхних слоев масла и ТННТ;
- модель технического состояния БМИ;
- модель динамики факторов эксплуатации;
- модель технического обслуживания (ТО);
- модель оценки скорости старения БМИ.

Модель тренда температуры верхних слоев масла построена на основе уравнения теплового баланса СТ [9]:

$$C_M \theta_o' = (I_d^2 Z + P_{xx}) - (\theta_o - \theta_a) / R_{IM}, \quad (1)$$

где  $C_M$  – теплоемкость трансформатора;  $I_d$  – ток нагрузки трансформатора, А;  $Z$  – активное сопротивление обмотки, Ом;  $P_{xx}$  – мощность потерь холостого хода, Вт;  $\theta_o$  – температура верхних слоев масла, выраженная в °С;  $\theta_a$  – температура охлаждающей среды, °С;  $R_{IM}$  – тепловое сопротивление трансформатора, Ом.

Структурная схема блока расчета температуры верхних слоев масла (термодинамическая модель) состоит из блока входной энергии, который рассчитывает энергию, выделяемую верхним, наиболее нагретым витком, блока, определяющего обратную величину теплоемкости, блоков, отражающих обратные величины тепловых сопротивлений, которые переключаются релейным переключателем в зависимости от режима охлаждения [11].

Определение параметров термодинамической модели (теплоемкость трансформатора и тепловые сопротивления для разных видов охлаждения) может производиться по результатам тепловых испытаний СТ. Исходными данными для расчета служат значения превышения температуры  $\Delta\theta$  масла в условиях, в которых производятся тепловые испытания и тепловой постоянной  $\tau$  для разных видов охлаждения. Расчет текущих значений теплоемкости  $C$  и теплового сопротивления  $R_l$  производится по методике, описанной в [11]:

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

$$C = \frac{(\theta_{o1} - \theta_{a1})(I_{d2}^2 Z + P_{xx})}{(\theta_{o1} - \theta_{a1})\theta_{o2}' - (\theta_{o2} - \theta_{a2})\theta_{o1}'} - \frac{(\theta_{o2} - \theta_{a2})(I_{d1}^2 Z + P_{xx})}{(\theta_{o1} - \theta_{a1})\theta_{o2}' - (\theta_{o2} - \theta_{a2})\theta_{o1}'}; \quad (3)$$

где  $\theta_{o1}'$ ,  $\theta_{o1}$ ,  $I_{d1}$ ,  $\theta_{a1}$  – производная температуры верхних слоев масла, температура верхних слоев масла, ток нагрузки и температура окружающей среды соответственно в момент времени  $\Delta t$ ;  $\theta_{o2}'$ ,  $\theta_{o2}$ ,  $I_{d2}$ ,  $\theta_{a2}$  – производная температуры верхних слоев масла, температура верхних слоев масла, ток нагрузки и

температура окружающей среды соответственно в текущий момент времени  $t$ .

Расчет тренда ТННТ производится по методике, приведенной в стандарте [12] в соответствии с уравнением для естественного охлаждения (ОН):

$$\theta_h = \theta_a + \Delta\theta_{br} \left[ \frac{1 + RK^2}{1 + R} \right]^x + H_{gr} K^y, \quad (4)$$

где  $\theta_h$  – температура наиболее нагретой точки изоляции, выраженная в °С;  $\Delta\theta_{br}$  – превышение температуры масла в нижней части обмотки;  $H_{gr}$  – градиент ТННТ;  $K$  – коэффициент нагрузки;  $y$  – показатель степени обмотки;  $R$  – отношение потерь.

Для принудительного охлаждения (ОФ) уравнение имеет вид:

$$\theta_h = \theta_a + \Delta\theta_{br} \left[ \frac{1 + RK^2}{1 + R} \right]^x + 2[\Delta\theta_{imr} - \Delta\theta_{br}] K^y + H_{gr} K^y, \quad (5)$$

где  $\Delta\theta_{imr}$  – превышение средней температуры масла.

*Модель технического состояния БМИ.* Модель технического состояния ТМ выполняет расчет трендов показателей  $W$  и  $K$  на основе экспертных оценок по выражениям [10]

$$W(t) = W_0 + M_W(t - T_{TO}); \quad (6)$$

$$K(t) = K_0 + M_K(t - T_{TO}), \quad (7)$$

где  $W_0$ ,  $K_0$  – показатели  $W$  и  $K$  в момент начала эксплуатации и после завершения ТО;  $M_W$ ,  $M_K$  – коэффициент приращения показателей  $W$  и  $K$  в процессе старения ТМ.

*Модель динамики факторов эксплуатации (ФЭ).* Модель ФЭ синтезирует прогнозируемые тренды  $I_d$  и  $\theta_a$ . В качестве модели  $\theta_a$  использована двойная синусоидальная функция [12], которая дополнена компонентой, характеризующей многолетние климатические изменения.

Входные параметры и структура тренда  $I_d$  зависят от требований к точности прогноза расхода ресурса изоляции, наличия данных мониторинга параметров СТ в периоды, предшествующие моменту прогноза, детальности данных о предполагаемых нагрузках СТ в период прогноза. В качестве модели  $I_d$  использована модель

$$I_d = P_c I_{zav} N_c + \Delta I_{dc} P_c(N_{dc}) \times \Delta I_{dc} P_d(N_c), \quad (8)$$

где  $P_c$  – коэффициент изменения среднегодового тока;  $I_{zav}$  – среднегодовой ток нагрузки на момент прогноза;  $\Delta I_{dc}$  – среднегодовое изменение тока нагрузки;  $P_c$  – коэффициент среднесуточных изменений;  $N_{dc}$  – номер дня в году;  $\Delta I_{dc}$  – среднесуточные изменения тока нагрузки;  $P_d(N_c)$  – коэффициент зависимости от дня недели;  $N_c$  – номер дня в неделе.

Модель ТО формирует команды на включение охлаждения РЕЖИМ ОХЛ и техническое обслуживание масла ТО, основываясь на входных данных уставки охлаждения  $\theta_o$  и режимах ТО ТМ (плановое, по техническому состоянию), базовых показателей ТМ ( $K_{БАЗ}$ ,  $W_{БАЗ}$ ), а также выходных данных модели

ТС ( $\theta_h, W, K$ ). В контуре регулювання температури модель ТО містить релейний регулятор. В контурі ТО ТМ модель ТО містить блоки порівняння поточного модельного часу з часом планового ТО; поточних значень  $W, K$  з максимально допустимими  $W_{\max}, K_{\max}$  [11].

Команда ТО формулюється як логічне ІЛИ перерахованих результатів порівняння. По цій команді поточні значення  $K$  і  $W$  в блоці ТС ТМ зменшуються до  $K_{БАЗ}, W_{БАЗ}$ .

Модель оцінки швидкості старіння БМІ. Оцінка швидкості старіння проводиться з допомогою уточненої формули інтеграла старіння [9]:

$$L(t_0, t_0 + T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \left( \frac{K}{K_{БАЗ}} \right)^{2,05} \times (10,66 \ln(W_t) + 12,85) \times \exp \left[ \ln 2 \frac{(\theta_h - 98)}{\Delta} \right] dt, \quad (9)$$

де  $L(t_0, t_0 + T)$  – знос ізоляції в інтервалі часу, який починається в момент  $t_0$  і має тривалість  $T$ ;  $K, K_{БАЗ}$  – поточний і базовий показники кислотності масла, виражені в мг КОН/г

відповідно;  $W, W_{БАЗ}$  – поточний і базовий показники вологості бумажної ізоляції, виражені в % від маси;  $\Delta$  – інтервал температур  $\theta_h$ , на якому відбувається, при інших рівних умовах, удвоєння зносу ізоляції,  $\Delta = 6^\circ\text{C}$ .

Для термічно покращеної паперу рівняння має вигляд:

$$L(t_0, t_0 + T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \left( \frac{K}{K_{БАЗ}} \right)^{2,05} \times (10,66 \ln(W_t) + 12,85) \times \exp \left[ \ln e \left( \frac{15000}{110 + 273} - \frac{15000}{\theta_h + 273} \right) \right] dt. \quad (10)$$

Алгоритм роботи. В результаті був обґрунтований наступний алгоритм роботи з програмою.

1. Формування початкових даних для моделювання, які діляться на наступні групи:

- параметри СТ (номінальний ток СТ  $I_n, P_{\text{хх}}, Z$  і т.д.);
- параметри моделі ТС БМІ (базові  $W_{БАЗ}, K_{БАЗ}$  і граничні  $W_{\max}, K_{\max}$  значення вологості бумажної ізоляції і кислотності масла);

Рисунок 2 – Окно формування параметрів термодинамічної моделі по результатам теплових випробувань і окно розрахунку витраченого ресурсу БМІ для різних режимів динаміки теплового опору

– параметри моделі ФЭ (амплітуди щорічного змінення середньодобової температури  $A$  і щоденного змінення температури охолоджуючої середовища  $B$ , середньорічна температура оточуючої середовища  $\theta_{\text{от}}$ ) і тренда навантаження (ток навантаження  $I_d$ , середньодобові  $\Delta I_{dc}$  і середньорічні  $\Delta I_{de}$  змінення току навантаження, коефіцієнт змінення середньорічного току  $P_e$ );

– граничні умови (максимально допустиме значення ТННТ, максимально допустиме значення вологості бумажної ізоляції).

Істочниками початкових даних можуть служити результати теплових випробувань даного одиничного СТ або його аналогів, дані моніторингу параметрів, дані об умовах експлуатації одинич-

ного СТ или трансформаторов, эксплуатирующихся в аналогичных условиях, результаты расчетов.

Блок определения параметров термодинамической модели реализован как часть программы WOPTWI (рис. 2).

2. Ввод исходных данных осуществляется в окнах ввода, которые вызываются из главного окна программы. Для первого моделирования необходим поочередный ввод всех исходных данных, в дальнейшем возможно изменять значения параметров в отдельных блоках.

3. Определение периодичности технического обслуживания. Выбор необходимого интервала ТО осуществляется из выпадающего списка "Периодичность ТО" в главном окне программы.

4. Выбор периода прогнозирования осуществляется путем ввода значения в годах в окне "Пер. прогн., лет".

5. Запуск моделирования, вывод результатов в виде графика израсходованного ресурса в часах и числового значения израсходованного ресурса в годах.

6. Оценка полученных результатов, при необходимости корректировка исходных данных и повторный запуск моделирования. При превышении параметрами  $W$  и ТННТ заданных граничных условий моделирование останавливается и на экран выводится предупреждение об аварийных условиях работы СТ. Появление этого сообщения говорит о необходимости корректировки исходных данных и повторном запуске моделирования.

Также в программу включена модель динамики технического состояния элементов системы охлаждения, описанная в [11]. Моделирование может про-

изводиться для стабильного, линейно возрастающего или аварийного значений теплового сопротивления (рис. 2).

*Пример использования.* Для оценки прогнозируемого расхода ресурса БМИ СТ в течение следующих 25 лет вводим в программу исходные данные:

$I_n = 406$  А,  $P_{xx} = 29,3$  Вт,  $W_{max} = 5$  %,  $W_{БАЗ} = 0,37$  %,  $K_{max} = 0,29$  мг КОН/г,  $K_{БАЗ} = 0,2$  мг КОН/г,  $\theta_{ay} = 9,4$ °С,  $A = 12,6$ °С,  $B = 4$ °С,  $T_r = 2$ °С,  $P_2 = 2$  А,  $\Delta I_{dc} = 20$  А,  $\Delta I_{dz} = 20$  А,  $I_d = 244,2$  А, максимально допустимое значение ТННТ принято равным 150 °С, максимально допустимое значение влагосодержания бумажной изоляции – 5 %.

Моделирование осуществлялось три раза. Получены следующие результаты: при периодичности ТО один раз в десять лет значение израсходованного ресурса составляет 27,7 лет, при периодичности ТО один раз в пять лет – 15,9 лет, а при периодичности ТО один раз в два года – 5,9 лет. Время моделирования для каждого расчета – 17,5 с.

Примеры графиков, полученных в результате моделирования, приведены на рис. 3, 4. На рис. 3 представлены тренды температуры охлаждающей среды  $\theta_a$ , температуры верхних слоев масла  $\theta_o$ , температуры наиболее нагретой точки  $\theta_h$ , тока нагрузки  $I_d$ , а также скорости расхода ресурса, зависящие от степени окисленности и увлажнения БМИ СТ.

График "Cooling" иллюстрирует работу системы охлаждения СТ. При этом значение «0» соответствует состоянию системы охлаждения «ВЫКЛЮЧЕНА», а значение «1» – «ВКЛЮЧЕНА».

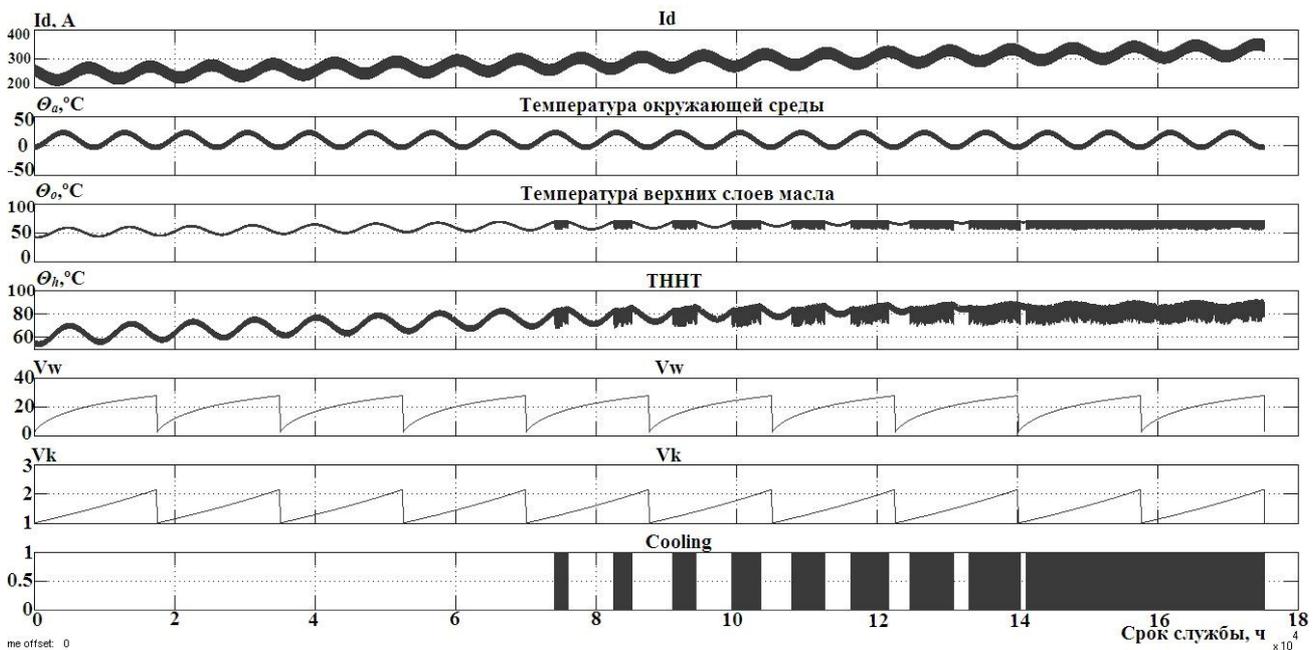


Рисунок 3 – Динамика изменения параметров СТ в течение первого года моделирования

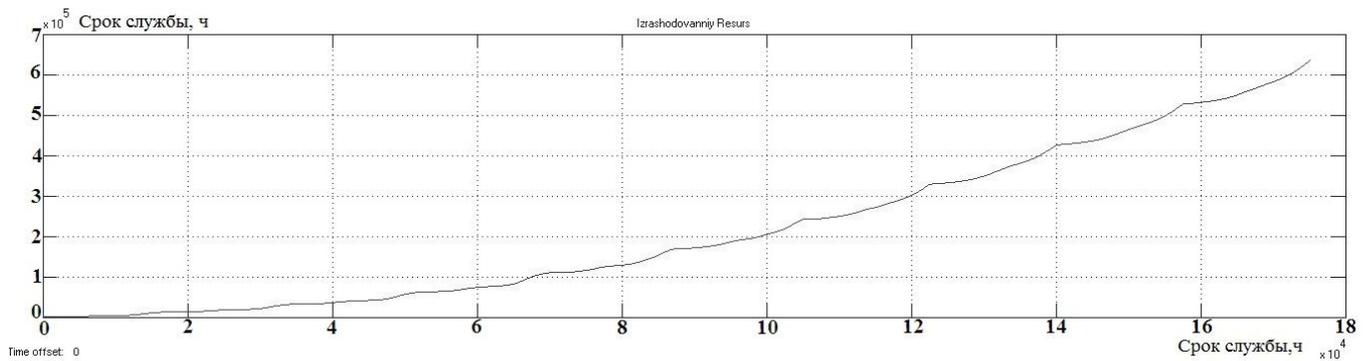


Рисунок 4 – Тренд израсходованного ресурса БМИ СТ

График, иллюстрирующий рост значения израсходованного ресурса за время эксплуатации, приведен на рис. 4.

**ВЫВОДЫ.** В разработанной программе предложенные авторами в ряде работ методики доведены до уровня практической реализации в виде прикладной компьютерной программы.

Научная новизна работы заключается в том, что в качестве основных факторов, повышающих достоверность прогноза по сравнению с предыдущими аналогами, предложено использование не только статистики предыдущей эксплуатации и результатов мониторинга БМИ СТ, но и прогнозирование динамики факторов эксплуатации, тепловых параметров СТ и состояний системы охлаждения в будущем.

Предполагается использовать полученные результаты при разработках перспективных систем мониторинга СТ фирмы «Энергоавтоматизация» (Запорожье). Также в дальнейшем предполагается дополнить существующую программу блоком оценки прогнозируемой экономической эффективности эксплуатации СТ в прогнозируемых условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васин В.П., Долин А.П. К задаче оценки остаточного ресурса изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов // Новое в российской электроэнергетике. – 2008. – Вып. 3. – С. 42–55.
2. Васин В.П., Долин А.П. Ресурс изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2008. – Вып. 3. – С. 12–17.
3. Сучков Р.В. Силовые трансформаторы. Модернизация и сервисное обслуживание компанией АББ // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2004. – Вып. 5. – С. 47–51.
4. Русов В.А., Овсянников А.Г., Живодерников С.В. Зарубежный опыт мониторинга состояния маслонаполненного оборудования // Материалы IV научно-практического семинара Общественного совета специалистов Сибири и Востока по пробле-

мам мониторинга трансформаторного оборудования и диагностики электрических установок, 20–24 апреля 2009 г. – Новосибирск: ГЦРО, 2009. – С. 7–22.

5. Рассальский А.Н., Конограй С.П., Гук А.А. и др. Результаты внедрения системы непрерывного контроля силовых трансформаторов на подстанции «Ленинградская» // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – 2009. – Вып. 3 (56). – С. 150–154.

6. Мордкович А.Г., Туркот В.А., Филиппов А.А., Цфасман Г.М. Система управления, мониторинга и диагностики трансформаторного оборудования СУМТО // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2007. – Вып. 6. – С. 16–19.

7. Koncan-Gradnik M., Gradnik T., Mulej M. Asset Management of transformers using accredited physical-chemical diagnostics and on-line monitoring in Slovenia. – Paper no. A2-213, CIGRE–2008. – Paris, 2008.

8. Грабко В.В., Бальзан І.В. Математична модель для діагностування обмоток силового масляного трансформатора з урахуванням факторів зовнішнього впливу // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2011. – Вып. 15. – С. 135–136.

9. Василевский В.В. Оценка расхода ресурса бумажной изоляции силового маслонаполненного трансформатора с помощью уточненной формулы интеграла старения // Электротехника и электромеханика. – 2015. – Вып. 1. – С. 23–28.

10. Поляков М.А., Василевский В.В. Prognosis of wearing out of power transformer winding insulation // Технічна електродинаміка – 2014. – Вып. 5. – С. 65–67.

11. Поляков М.А. Идентификация тепловых параметров силового масляного трансформатора по данным мониторинга параметров // Вісник східноукраїнського національного університету – 2007. – Вып. 11 (117), част. 1. – С. 167–173.

12. IEC 60076–7 Ed. 1: Power transformers. – Part 1: Loading guide for oil-immersed power transformers. – 2005. – Iss. 14/512/FDIS.

## AUTOMATION OF RESOURCE ASSESSMENT OF OIL-IMMERSED POWER TRANSFORMERS PAPER INSULATION AT DIFFERENT PHASES OF LIFECYCLE

V. Vasilevskij, M. Polyakov

Zaporizhzhya National Technical University

vul. Zhukovskogo, 64, Zaporozhye, 69002, Ukraine. E-mail: Lisses@ukr.net

The relevance of automation of projected resource characteristics assessments of transformers insulation is motivated by need to ground of project and operational solutions at different phases of transformers lifecycle. The analysis of the known means of resource assessments automation of oil-immersed power transformers solid insulation was performed. Offered the program to automate prognosis resource characteristics calculation. The program implements the possibility to forming trends of load, ambient temperature, moisture content in paper insulation, acidity of oil by using available monitoring data of power transformer or rated parameters. Calculation of the hottest spot temperature, top-oil temperature and expended resource of paper insulation performing by using this trends. Implemented the ability to formation of transformers thermal parameters based on thermal tests. Simulation of changing of cooling system technical state is performed. Described the supposed algorithm of using the program, performed simulation. Results of simulations are presented as graphs illustrating transformers basic parameters changing. Developed program allows to increase accuracy of resource characteristics estimating compared to manual calculation or other programs.

**Key words:** oil-paper insulation, power transformer, computer model.

### REFERENCES

1. Vasin, V.P. and Dolin, A.P. (2008), "The problem of resource assessment of oil-immersed power transformer's insulation", *Novoe v rossijskoj elektroenergetike*, no. 3, pp. 42–55. (in Russian)
2. Vasin, V.P. and Dolin, A.P. (2008), "Resource of power oil-immersed transformer's insulation", *ELEKTRO. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost*, no. 3, pp. 12–17. (in Russian)
3. Suchkov, R.V. (2004), "Power transformers. Modernization and maintenance by ABB company", *ELEKTRO. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost*, no. 5, pp. 47–51. (in Russian)
4. Rusov, V.A., Ovsyannikov, A.G. and Zhivodernikov, S.V. (2009), "Foreign experience of oil-filled equipments monitoring", *Materialy IV nauchno-prakticheskogo seminaru Obshchestvennogo soveta spetsialistov Sibiri i Vostoka po problemam monitoringa transformatornogo oborudovaniya i diagnostiki elektricheskikh ustanovok* [Proceedings of the IV scientific workshop of the Public Council of experts of Siberia and the East on the monitoring of transformer equipment and diagnostics of electrical installations]. (in Russian)
5. Rassalskij, A.N., Konograj S.P., Guk A.A. et al. (2009), "The results of the implementation of power transformer's online monitoring system at "Leningradskaya" substation", *Visnyk KDPU imeni Mykhajla Ostrohradskogho*, Vol. 3, no. 56, pp. 150–154. (in Russian)
6. Mordkovich, A.G., Turkot, V.A., Filippov, A.A. and Cfasman, G.M. (2007), "SUMTO – system of transformer's management, monitoring and diagnostics", *ELEKTRO. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost*, no. 6, pp. 16–19. (in Russian)
7. Grabko, V.V. and Balzan, I.V. (2011), "Mathematical model for diagnosing of windings of the power oil transformer with consideration of the factors of external action", *Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy*, no. 15, pp. 135–136. (In Ukrainian)
8. Koncan-Gradnik, M., Gradnik, T. and Mulej, M. (2008), "Asset Management of transformers using accredited physical-chemical diagnostics and on-line monitoring in Slovenia", no. A2–213, CIGRE–2008, Paris.
9. Vasilevskij, V.V. (2015), "Evaluation of the resource consumption of oil-filled power transformers paper insulation basing on updated aging integral", *Elektrotexnika i elektromexanika*, no. 1, pp. 18–21. (in Russian)
10. Polyakov, M.A. and Vasilevskij, V.V. (2014), "Prediction of deterioration of the insulation of power transformer windings", *Tekhnichna elektrodynamika*, no. 5, pp. 65–67. (in Russian)
11. Polyakov, M.A. (2007), "Identification of thermal parameters of oil-immersed power transformer according to the monitoring parameters", *Visnyk skhidnoukrayinskogo natsionalnogo universytetu*, Vol. 11, no. 117, pp. 167–173. (in Russian)
12. IEC 60076-7 (2005), Ed. 1: Power transformers, Part 1: Loading guide for oil-immersed power transformers, Vol. 14/512/FDIS.

Стаття надійшла 16.06.2015.