

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ УЧЕТА ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Запропонована методика оцінки залишкового ресурсу ізоляції силового трансформатору шляхом імітаційного моделювання прогнозованих результатів впливів зовнішніх факторів на стан ізоляції.

Предложена методика оценки остаточного ресурса изоляции силового трансформатора путем имитационного моделирования прогнозируемых результатов воздействий внешних факторов на состояние изоляции.

ВВЕДЕНИЕ

Силовой трансформатор (СТ) – важнейший элемент систем электроснабжения. Продление фазы эксплуатации его жизненного цикла (ЖЦ) всегда было актуальной задачей науки и практики. Оценка такой возможности производится на основе анализа остаточных ресурсов СТ, среди которых определяющим является ресурс изоляции активной части обмоток (далее "изоляция"). Стандартами в области "надежность в технике" ресурс определяется как временная характеристика объекта – время, за которое техническое состояние объекта с определенной степенью уверенности достигнет своего критического значения, при котором дальнейшая эксплуатация объекта недопустима. Критическое состояние изоляции связывается с определенной степенью полимеризации целлюлозы – материала изоляции.

АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ

Расход ресурса изоляции характеризуется интегралом старения [1]:

$$L(t_0, t_0 + T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0 + T} \left(\frac{K}{K_{БАЗ}} \right)^{2,05} \times \left(\frac{W}{W_{БАЗ}} \right)^{1,493} \cdot \exp \left[\ln 2 \cdot \frac{(\theta_h - 98)}{\Delta} \right] dt, \quad (1)$$

где $L(t_0, t_0 + T)$ – износ изоляции в интервале времени, который начинается в момент t_0 и имеет длительность T ; K , $K_{БАЗ}$ – текущий и базовый показатель кислотности масла, соответственно; W , $W_{БАЗ}$ – текущий и базовый показатель влагосодержания масла, соответственно; θ_h – температура наиболее нагретой точки изоляции; Δ – интервал температур θ_h , на котором происходит, при прочих равных условиях, удвоение износа изоляции, $\Delta = 6^\circ\text{C}$ (в соответствии с рекомендациями [2]) или 7°C [3]. Таким образом, выражение (1) определяет износ изоляции как функцию показателей K , W , θ_h узлов СТ, значения которых в свою очередь зависят от времени.

В работах [1, 3] утверждается, что расход ресурса изоляции это случайный процесс, а остаточный ресурс – случайная величина. В соответствии с этим подходом на основании данных о расходе ресурса по нескольким годам работы СТ средствами математической статистики вычисляется γ – процентный износ. Вместе с тем, в известных работах не раскрыты механизмы и характер случайности расхода ресурса, его взаимосвязь с факторами эксплуатации СТ, что снижает достоверность оценки γ – процентного износа.

ЗАДАЧА ИССЛЕДОВАНИЯ

Задача работы состоит в разработке методики оценки остаточного ресурса изоляции СТ как случайной величины, включая:

- выбор/разработку моделей зависимостей значений показателей входящих в "интеграл старения" от параметров эксплуатации и технического состояния СТ;
- выбор/разработку методики прогнозирования параметров эксплуатации технического состояния СТ;
- определение путем компьютерного моделирования значений показателей СТ во временном интервале прогноза износа изоляции и оценку статистических результатов расчета по этим данным "интеграла старения", включая γ – процентный износ.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Фазы жизненного цикла СТ и их роль в формировании и расходовании ресурса изоляции приведены на рис. 1.

С позиций поставленной задачи оценки остаточного ресурса изоляции, фазу проектирования, включая проектирование технологических процессов (ТП) изготовления, охарактеризуем как процесс принятия решений, относительно конструкции и технологии изготовления, ограничивающих потенциальный R^n ресурс. А также как процесс (конечно непреднамеренного) внесения скрытых конструктивных и технологических дефектов в СТ.

Так, принимая решение о выборе материала изоляции обмоток, проектирант фактически задает параметры относительной скорости расхода ресурса этой изоляции вследствие термического износа [2]:

- для обычной бумаги:

$$V = 2 \frac{(\theta_h - 98)}{\Delta}, \quad (2)$$

- для термически улучшенной бумаги:

$$V = e^{\left(\frac{15000}{110+273} - \frac{15000}{\theta_h+273} \right)}. \quad (3)$$

Входными данными для проектирования (ВДП) являются цели проектирования, требования, представления об идеальных решениях и решениях-аналогах, а также качество персонала, включая его профессионализм и ответственность. Результатами проектирования являются комплект конструкторской (КД) и технологической (ТД) документации на СТ, а также модель потенциального ресурса R^n , с параметрами, которые отражают принятые решения относительно конструкции и технологии изготовления.



Рис. 1. Фазы жизненного цикла СТ

В фазу изготовления включим, кроме собственно изготовления в условиях завода, транспортировку и монтаж изделия на объекте заказчика. Эта фаза характеризуется внесением явных и скрытых дефектов в ходе технологических (формообразующих, сборочно-монтажных и др.) операций ТП и коррекцию качества изделия в ходе контрольных операций.

Входными данными для оценки ресурса на стадии изготовления являются качество КД, ТД, материалов, комплектующих, оборудования и персонала (МКОП). Результатом изготовления является изделие с реальным R^p ресурсом относительно некоторого диапазона ожидаемых условий эксплуатации. Техническое состояние СТ определяется вероятным наличием в нем скрытых дефектов, определяемых качеством КД, ТД и МКОП. Вследствие чего, как правило, $R^p < R^n$. Модель R^p опишем как нечеткую функцию ресурса зависящую от переменных отклонений входных факторов фазы изготовления от нормы. Разработка этой модели выходит за рамки данной работы и будет рассмотрена отдельно.

В фазе эксплуатации происходят изменения технического состояния (ТС) и ресурса СТ. Входными данными для учета этих изменений в подфазе, собственно, эксплуатации являются данные мониторинга параметров технического состояния, дестабилизирующих факторов эксплуатации и изменений нагрузки СТ (ФЭиН).

Результатами процесса эксплуатации, кроме эффектов у потребителей электроэнергии, являются расход ресурса, выявленные дефекты и отклонения от нормы параметров ТС а также параметры оперативной (среднесрочной) модели прогноза (ОП) динамики факторов внешней среды и нагрузки.

В подфазе технического обслуживания (ТО) происходит устранение выявленных дефектов и восстановление ТС изоляции, например путем регенерации или замены масла. Эффективность этой работы зависит от моментов времени проведения и качества ТО, включая качество МКОП. В результате ТО в экс-

плуатацию возвращается СТ, который может находиться в эксплуатации больший срок, чем до ТО. Оценка этого срока должна проводиться на основе ОП и СП значений параметров внешних воздействий на СТ, моделей параметров СТ как функций этих воздействий и моделей расхода ресурса. Параметры ОП должны учитывать характер "быстрых" изменений внешних факторов, длительности которых соизмеримы со значениями тепловых постоянных обмотки и масла, а также параметры суточных, недельных, сезонных циклов температуры, влажности и нагрузки.

Горизонт СП соизмерим со сроками продления эксплуатации СТ и может превышать десять лет. Примером параметра ОП может служить амплитуда бросков нагрузки СТ, а СП – динамика среднесуточного, среднегодового тока нагрузки конкретного СТ в ближайшем десятилетии. При оценке ресурса R^o должна учитываться также запланированная периодичность ТО и ее влияние на износ. Модель R^o базируется на моделях реального ресурса R^p и модели расхода L . Модель R^o должна учитывать вероятностный характер ОП и СП.

Фаза эксплуатации переходит в фазу утилизации при возникновении финальной аварии СТ. Эта фаза используется при построении модели финального ресурса R^ϕ .

Рассмотрим более подробно процесс определения ресурса R^o . С этой целью определим следующие моменты времени: t^{p^o} – завершения изготовления; t^{p^i} – последнего экспериментального определения ресурса R^o ; t^x – прогнозирования; $t^x + T^\gamma$ – прогнозируемого с γ – процентной степенью уверенности завершения эксплуатации.

Задача определения в момент t^x ресурса R^o сводится к нахождению T^γ , т.е. $R^o = T^\gamma$, для которого:

$$R^p - L^p(t^{p^o}, t^x) = L^n(t^x, t^x + T^\gamma) \quad (4)$$

или

$$R^{p^i} - L^p(t^{p^i}, t^x) = L^n(t^x, t^x + T^\gamma), \quad (5)$$

где $L^p(t^{p^o}, t^x)$, $L^p(t^{p^i}, t^x)$ – измеренный ("реальный")

расход ресурса на интервалах $[t^{po}, t^x]$ и $[t^{pi}, t^x]$, соответственно; $L^n(t^x, t^x + T^n)$ – прогнозируемый расход ресурса на интервале $[t^x, t^x + T^n]$.

Под измерением расхода будем понимать его расчет по формуле (1), куда подставляются измеренные в процессе мониторинга параметров реального СТ значения $\theta_h^u(t)$, $W^n(t)$, $K^n(t)$, $t \in [t^{po}, t^x]$ или $t \in [t^{pi}, t^x]$.

Под прогнозированием расхода будем понимать его расчет по формуле (1), по прогнозируемым с помощью компьютерной модели значениям $\theta_h^n(t)$, $W^n(t)$, $K^n(t)$, $t \in [t^x, t^x + T^n]$ и параметров технического состояния СТ.

Компьютерные модели K , W , θ_h могут быть построены на основе уравнений соответствующих балансов: теплового – для θ_h ; баланса влажности масла – для W ; баланса кислотосодержания – для K . Уравнения соответствующих балансов – это дифференциальные уравнения, позволяющие определить изменение параметра, влияющего на расход ресурса изоляции, в зависимости от значений факторов эксплуатации. Параметры этих уравнений могут быть определены через конструктивные характеристики СТ, результаты испытаний или мониторинга параметров. Так, известны термодинамические модели СТ [2, 5, 6], позволяющие при известных тепловых параметрах СТ определить изменение θ_h как реакцию на уровень тока нагрузки I_d и температуру окружающей среды θ_a . В работах [7, 8] приведены примеры моделирования изменений технического состояния элементов СТ.

Решение задачи прогнозирования расхода ресурса связано с последовательным решением этих уравнений для всех значений $I_d(t)$ и $\theta_a(t)$ в интервале времени $t \in [t^x, t^x + T^n]$ с интервалом изменения времени Δt . Неопределенность прогнозов нагрузки и температуры окружающей среды заставляет рассматривать $I_d(t)$ и $\theta_a(t)$ как случайные функции прогноза (СФП). Из-за этого уравнения балансов приобретают свойства стохастических дифференциальных уравнений и могут быть решены относительно некоторого количества реализаций СФП с оценкой вероятности появления этих реализаций. Совокупность этих оценок формирует функцию вероятностей реализаций СФП (ФВР СФП).

Таким образом, каждой сочетанию реализаций СФП I_d^y , θ_a^y имеющему вероятность появления $P(I_d^y, \theta_a^y)$, соответствует полученное в результате моделирования θ_h и рассчитанный по формуле (1) износ L . Следовательно, вероятность износа – это вероятность появления соответствующего сочетания реализации СФП. Совокупность вероятностей износа для различных сочетаний реализаций СФП I_d и θ_a задает функцию вероятностей износа, по которой может быть определен γ – процентный износ.

Прогнозирование индивидуального энергопотребления множества потребителей на срок продления эксплуатации СТ назначаемый на многие годы является сложной задачей. Учитывая необходимую дискретность определения I_d соизмеримую с тепловыми постоянными обмоток – единицы минут.

Для целей определения остаточного ресурса параметры прогноза факторов эксплуатации должны включать параметры быстрых изменений (бросков)

нагрузки, параметры суточных, недельных, сезонных, годовых циклов изменения нагрузки, температуры θ_a , параметры среднегодовых токов потребления:

$$I_d^y = P_z \cdot I_{zav} \cdot N_z + \Delta I_{dz} \cdot P_c \cdot (N_{dz}) + \Delta I_{dc} \cdot P_\theta (N_{\theta n}) + \Delta I_{dq} \cdot P_q (N_q) + \Delta I_{di} \cdot K_i (N_i) \quad (7)$$

где P_z – коэффициент изменения среднегодового тока; I_{zav} – среднегодовой ток нагрузки на момент прогноза; N_z – номер годового интервала прогноза; ΔI_{dz} – среднегодовое изменение тока нагрузки; P_c – коэффициент среднесуточных изменений; N_{dz} – номер дня в году; ΔI_{dc} – среднесуточные изменения тока нагрузки; $P_\theta(N_{\theta n})$ – коэффициент зависимости от дня недели; $N_{\theta n}$ – номер дня в неделе; ΔI_{dq} – среднечасовое изменение тока нагрузки; P_q – коэффициент, зависящий от номера часа; N_q – номер часа в сутках; ΔI_{di} – амплитуда броска тока нагрузки; K_i – интервал броска тока нагрузки; N_i – номер интервала броска тока нагрузки.

Для формирования значений переменных N_z , N_{dz} , $N_{\theta n}$, N_q , N_i в компьютерную модель расчета расхода ресурса вводится блок календаря. Значения коэффициентов P_c , P_q , P_θ , ток I_{zav} , изменения токов ΔI_{dz} , ΔI_{dq} определяются по данным мониторинга до момента прогнозирования. Значение P_z – из прогнозов роста электропотребления в зоне нагрузок СТ. Для определения ΔI_{di} и K_i воспользуемся методикой [9].

Результаты моделирования по предложенной методике существенно отличаются от результатов статистической оценки по методике [1, 3].

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ показывает, что все фазы жизненного цикла СТ оказывают существенное влияние на ресурс изоляции. Основным инструментом определения остаточного ресурса является имитационное моделирование процессов старения. Определяющим фактором повышения точности оценки является повышение точности прогнозирования динамики факторов изоляции за счет одновременного учета факторов из разных временных диапазонов – диапазонов скачков нагрузки, суточных, недельных и сезонных циклов, долголетних прогнозов нагрузки. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку и исследование компьютерной модели СТ более полно отражающей взаимосвязи дестабилизирующих факторов эксплуатации и параметров изоляции, а также разработку моделей формирования реального ресурса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васин В.П., Долин А.П. К задаче оценки остаточного ресурса изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов // Новое в российской электроэнергетике. – 2008. – №3. – С. 42-55.
2. IEC 60076-7 Ed. 1: Power transformers – Part 1: Loading guide for oil-immersed power transformers. Vol. 14/512/FDIS, Sept. 2005.
3. Васин В.П., Долин А.П. Ресурс изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2008. – №3. – С. 12-17.
4. Поляков М.А., Василевский В.В. Моделирование динамики распределений дефектов в изделиях в ходе технологического процесса // Системные технологии. – 2013. – №4(87). – С. 73-81.

5. Поляков М.А., Климов С.И. Методы и информационные технологии обработки данных мониторинговых параметров силового трансформатора // Вісник національного університету "Львівська політехніка". – 2009. – №637. – С. 70-73.
6. Коноград С.П. Применение модели старения твердой изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов для их диагностики в режиме эксплуатации // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – №1. – С. 43-45.
7. Поляков М.А., Мирошніченко А.Г. Исследование процессов идентификации тепловых параметров силового масляного трансформатора по данным мониторинга // Вісник східноукраїнського національного університету. – 2007. – №11. Ч.1(117). – С. 160-167.
8. Поляков М.А. От мониторинга параметров – к мониторингу состояний силового трансформатора // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – №1. – С. 49-52.
9. Поляков М.А. Конструирование и выбор вейвлетов для анализа тепловых процессов в силовом трансформаторе // Технічна електродинаміка. – 2012. – №3. – С. 119-120.

REFERENCES: 1. Vasin V.P., Dolin A.P. K zadache ocenki ostatoch-nogo resursa izoljacii silovyh maslonapolnennyh transformatorov. *Novoe v rossijskoj elektroenergetike*, 2008, no.3, pp. 42-55. 2. IEC 60076-7 Ed. 1: Power transformers – Part 1: Loading guide for oil-immersed power transformers. Vol. 14/512/FDIS, Sept. 2005. 3. Vasin V.P., Dolin A.P. Resurs izoljacii silovyh maslonapolnennyh transformatorov. *ELEKTRO. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaja promyshlennost'*, 2008, no.3, pp. 12-17. 4. Poliakov M.A., Vasilevskij V.V. Modelirovanie dinamiki raspredelenij defektov v izdelijah v hode tehnologicheskogo processa. *System technologies*, 2013, no.4(87), pp. 73-81. 5. Poliakov M.A., Klimov S.I. Metody i informacionnye tehnologii obrabotki dannyh monitornyh parametrov silovogo transformatora. *Bulletin of Lviv Polytechnic National University*, 2009, no.637, pp. 70-73. 6. Konogray S.P. A solid insulation ageing model

application to oil-filled power transformer for operation diagnostics. *Electrical engineering & electromechanics*, 2010, no.1, pp. 43-45. 7. Poliakov M.A., Miroshnichenko A.G. Issledovanie processov identifikacii teplovyh parametrov silovogo masljanogo transformatora po dannym monitoringa. *Bulletin of V. Dahl East Ukrainian National University*, 2007, no.11, part 1(117), pp. 160-167. 8. Poliakov M.A. From monitoring of parameters – to monitoring of the states of power transformer. *Electrical engineering & electromechanics*, 2011, no.1, pp. 49-52. 9. Poliakov M.A. Konstruirovanie i vybor vejvletov dlja analiza teplovyh processov v silovom transformatore. *Technical electrodynamics*, 2012, no.3, pp. 119-120.

Поступила (received) 25.10.2013

*Поляков Михаил Алексеевич¹, доц., к.т.н.,
Василевский Владимир Валентинович¹, аспирант,
¹ Запорожский национальный технический университет,
69063, Запорожье, ул. Жуковского, 64,
тел/phone +38 066 794 60 37,
e-mail: polyakov@zntu.edu.ua, Lisses@ukr.net*

M.A. Poliakov¹, V.V. Vasilevskij¹

*¹ Zaporizhzhya National Technical University
64, Zhukovsky Str., Zaporizhzhya, 69063, Ukraine*

Evaluation of power transformer insulation residual life based on its individual life cycle characteristics.

Analysis reveals that all phases of a power transformer life cycle have a significant effect on the isolation resource. The paper intro-duces a technique for evaluating residual life of power transformer insulation via simulation of predicted results of external factor actions on the transformer insulation condition.

Key words – insulation, power transformer, technical maintenance, failure, energy consumption.