

В.В. Василевский

МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ВЛАЖНОСТИ В СИСТЕМЕ «БУМАЖНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ» - «ТРАНСФОРМАТОРНОЕ МАСЛО» В НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМАХ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

З метою підвищення точності розрахунку ресурсних характеристик потужного трансформатору запропонована модель динаміки вологості паперово-масляної ізоляції. Запропонована модель відрізняється від вже існуючих врахуванням міграційних процесів вологи в паперово-масляній ізоляції під впливом зміння теплового режиму трансформатор. Виконано комп'ютерне моделювання зносу паперово-масляної ізоляції і зроблена оцінка впливу можливого зміння ступню вологості на ресурс. Бібл. 7, рис. 4.

Ключові слова: паперово-масляна ізоляція, потужний трансформатор, комп'ютерне моделювання, динаміка вологості.

С целью повышения точности расчета ресурсных характеристик силового трансформатора предложена модель прогнозирования динамики влажности бумажно-масляной изоляции. Предложенная модель отличается от существующих учетом процессов миграции влаги в бумажно-масляной изоляции под влиянием изменения теплового режима силового трансформатора. Проведено компьютерное моделирование износа бумажно-масляной изоляции и произведена оценка влияния возможного изменения степени увлажнения на ресурс. Библ. 7, рис. 4.

Ключевые слова: бумажно-масляная изоляция, силовой трансформатор, компьютерное моделирование, динамика влажности.

Введение. Создание систем мониторинга трансформаторного оборудования является актуальной научно-технической задачей. Известен ряд систем, как отечественных производителей (ООО «Энергоавтоматизация», ОАО «ЗТР» [1]), так и зарубежных (ABB, Siemens) [2], одной из функций которых является возможность оценки остаточного ресурса единичного силового трансформатора (СТ) на основании данных мониторинга.

Ресурс маслonaполненного силового трансформатора в основном определяется ресурсом его бумажной изоляции (БИ). Влияние на расход ресурса БИ СТ оказывают следующие факторы: изменение температуры, степень увлажнения целлюлозы и трансформаторного масла (ТМ), а также степень окисленности масла. Вода может образовываться в процессе эксплуатации как в самом СТ, в качестве продукта старения БИ, так и попадать из окружающей среды вследствие частичной разгерметизации бака. Миграция влаги в изоляционной системе происходит под влиянием изменения теплового режима СТ.

Важной проблемой при вычислении прогнозируемых ресурсных характеристик в эксплуатации СТ является построение возможных трендов влажности бумажно-масляной изоляции (БМИ), кислотности ТМ и изменения факторов эксплуатации, таких как температура окружающей среды и ток нагрузки.

Анализ исследований. Существующие модели влагообмена определяются их назначением – определение влажности БИ на основе измерения влажности ТМ в процессе мониторинга СТ с применением кривых равновесного содержания влаги [3] или расчетных методов [4]. В таких моделях не учитывается (или учитывается в недостаточной степени) возможное изменение факторов эксплуатации в горизонте прогноза.

Также возможно формирование тренда влажности БИ исходя из предположения, что рост влагосодержания БМИ СТ в результате старения составит

приблизительно 2-3 % [5] и что этот рост будет происходить линейно в течение эксплуатации.

В этом случае снижается точность прогноза расхода ресурса СТ, отсутствует возможность получить полную картину динамики влажности и оценить ее влияние на расход ресурса.

На данном этапе отсутствуют модели, с помощью которых можно было бы прогнозировать динамику влажности в изоляционной системе СТ с учетом динамики факторов эксплуатации, параметров технического обслуживания (ТО).

Постановка задачи. Цель исследования заключается в повышении точности расчета ресурсных характеристик БМИ СТ путем учета динамики влажности во взаимосвязи с динамикой температуры БИ и ТМ в модели расхода ресурса. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- предложить пути оценки влияния миграции влаги в БМИ СТ на ресурс БИ СТ;
- построить модель динамики влажности БМИ в неравновесном состоянии влагосодержания в БМИ во взаимодействии с моделями нагрузки, температуры окружающей среды и ТО СТ;
- провести компьютерное моделирование расхода ресурса БМИ с целью оценки влияния миграционных процессов влаги на расход ресурса БМИ.

Результаты исследований. Структурная схема взаимосвязи модели влагообмена в БМИ СТ с другими элементами модели прогнозирующей расход ресурса приведена на рис. 1. Она включает в себя модель внешних факторов эксплуатации (ФЭ, формирует тренды тока нагрузки I_d и температуры охлаждающей среды θ_a), модель технического состояния БМИ и технического обслуживания (ТС БМИ и ТО, формирует тренды теплоемкости и теплового сопротивления для разных видов охлаждения R_{ON} ; R_{OF} ; C_{ON} ; C_{OFF}), термодинамическую модель (ТДМ, формирует тренд темпе-

ратуры наиболее нагретой точки (ТННТ), θ_h), модель влагообмена в БМИ СТ и блок оценки износа (ОИ, расчет значения израсходованного ресурса L) [6].

Модель влагообмена, в свою очередь, состоит из блока влажности БИ (БВБИ) и блока влажности ТМ (БВТМ), которые взаимосвязаны между собой.

Расчетная влажность БИ в определенный момент времени t определяется по формуле [5]:

$$W_c = A \cdot e^{-B \cdot \theta_h} \cdot p^{k+a \cdot \theta_h}, \quad (1)$$

где W_c – расчетная влажность БИ, %; A, B, k, a – табличные данные для определенного вида изоляции; θ_h – ТННТ, °С; p – парциальное давление паров воды, мм рт. ст.

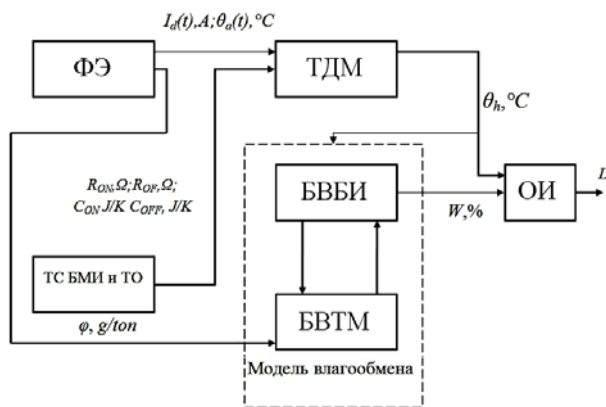


Рис. 1. Блок схема взаимосвязи модели влагообмена с другими моделями

Динамика влажности в системе БИ ТМ описана с помощью UML модели, приведенной на рис. 2.

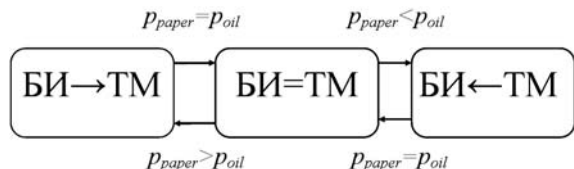


Рис. 2. Модель влагообмена в системе БИ ТМ

Модель представляет собой диаграмму состояний, переходы между которыми осуществляются с учетом соотношений между парциальными давлениями паров воды в БИ (p_{paper}) и ТМ (p_{oil}). В каждом состоянии выполняется соответствующее действие:

1) БИ→ТМ – перенос влаги из БМ в ТМ. Количество влаги, которое мигрирует из БМ в ТМ за период времени dt при изменении значения ТННТ определяется дифференциальным уравнением:

$$\frac{dW_{paper}}{dt} = \frac{W_{c.paper}(\theta_{h1}) - W_{paper}(\theta_{h2})}{\tau}, \quad (2)$$

где τ – постоянная времени переноса влаги; $W_{c.paper}(\theta_{h1})$ – влажность БИ W_c при ТННТ θ_{h1} , %; $W_{c.paper}(\theta_{h2})$ – влажность БИ W_c при ТННТ θ_{h2} , %.

Изменение степени увлажнения ТМ в результате миграции влаги из БИ:

$$\frac{dW_{oil}}{dt} = \frac{W_{c.oil}(\theta_{h1}) + \frac{W_{paper} \cdot m_{oil}}{m_{paper}}}{\tau}, \quad (3)$$

где $W_{c.oil}(\theta_{h1})$ – влажность ТМ при ТННТ θ_{h1} , %; m_{oil} – общая масса ТМ в СТ, т; m_{paper} – общая масса БИ в СТ, кг.

Значение влажности ТМ при ТННТ θ_{h1} определяется либо по результатам мониторинга, либо по результатам экспертной оценки.

2) БИ←ТМ – перенос влаги из ТМ в БИ. Количество влаги, которое мигрирует из ТМ в БИ за период времени dt , которое характеризуется изменением ТННТ:

$$\frac{dW_{paper}}{dt} = \frac{W_{c.paper}(\theta_{h2}) - W_{paper}(\theta_{h1})}{\tau}. \quad (4)$$

Изменение степени увлажнения ТМ в результате миграции влаги в БИ в этом случае:

$$\frac{dW_{oil}}{dt} = \frac{W_{c.oil}(\theta_{h1}) - \frac{W_{paper} \cdot m_{oil}}{m_{paper}}}{\tau}. \quad (5)$$

3) БИ = ТМ – равновесное состояние, к которому система стремится при равенстве температур БМ, ТМ и охлаждающей среды;

Во всех состояниях на этапе эксплуатации происходит прирост влаги в БИ и ТМ, динамика этого прироста описывается следующими дифференциальными уравнениями:

$$\frac{dm_{oil}}{dt} = k_{oil}, \quad \frac{dm_{paper}}{dt} = k_{paper}. \quad (6)$$

где k_{oil}, k_{paper} – коэффициенты, характеризующие прирост массы влаги в ТМ и БИ, соответственно, г/кг·ч; m_{oil}, m_{paper} – масса влаги в ТМ и БИ соответственно, кг.

Начальным состоянием является состояние БМ = ТМ, в котором система находится в течение промежутка времени dt , пока соблюдается равенство парциальных давлений паров воды в БМИ СТ. Исходными данными для модели влагообмена служат значения ТННТ, измеренной относительной влажности трансформаторного масла, температуры масла вблизи датчика влажности, содержание ароматических углеводородов в масле и табличные данные для определенного вида изоляции. Равновесное значение влажности БИ определяется по (1) для значений θ_{h1} и относительной влажности ТМ φ (%), величина φ определяется по данным мониторинга ТМ либо экспертным путем. Прирост влаги в БМИ СТ вследствие старения целлюлозы или разгерметизации бака СТ рассчитывается по формуле (6).

При изменении температурного режима СТ происходит нарушение баланса парциальных давлений и система переходит в состояние БМ→ТМ ($p_{paper} > p_{oil}$) либо в состояние БМ←ТМ ($p_{paper} < p_{oil}$). Динамика влажности в БИ и ТМ вследствие изменения парциальных давлений и градиентов влажности в течении периода времени dt рассчитывается по формулам (2-5).

Источниками исходных данных для расчета влагообмена служат данные моделей внешних эксплуатационных факторов (значение прироста влаги в результате разложения целлюлозы и поступления влаги из окружающей среды), модели технического состояния БМИ (изменения базовых показателей), термодинамической модели (ТННТ). Полученное значение

влажности бумажной изоляции используется при расчете ресурса в блоке оценки ресурса.

Модель ТО предусматривает возможность как планового ТО, так и ТО по техническому состоянию. Результат ТО СТ заключается в снижении влажности БИ и кислотности ТМ до определенных минимальных значений. При работе модели по варианту планового ТО понижение показателей влажности и кислотности БМИ СТ происходит в заданные периоды времени (путем сушки и регенерации БМИ СТ). В случае ТО по состоянию понижение показателей влажности и кислотности БМИ СТ происходит по достижении этими параметрами критических значений.

В предложенных моделях допущены следующие упрощения:

- процесс ТО СТ принят как процесс с нулевой длительностью;
- моделирование не учитывает изменения ресурсных характеристик БИ СТ в период времени от момента установки СТ на месте эксплуатации до момента включения его под нагрузку;
- рост степени окисленности масла происходит линейно в течение периода эксплуатации между двумя ТО.

В качестве базового тренда используемого для проверки адекватности получаемых с помощью модели результатов может быть принят тренд расхода ресурса СТ с аналогичными параметрами, оборудованного системой мониторинга, и находящегося в аналогичных условиях эксплуатации.

Для настройки модели влагообмена использованы кривые Ооммена или Фабра и Пиччона [7] для равновесного содержания влаги в системе БИ – ТМ. Предполагается, что перед включением СТ под нагрузку в результате термодинамических процессов температура в системе БМИ СТ – окружающая среда уравнивается и будет равна θ_a . В соответствии с законом равновесия [5] парциальные давления паров воды в системе также уравниются. Для задания начальных условий моделирования θ_h принимается постоянной и равной θ_a , абсолютная влажность ТМ равна 10-15 г/т (что соответствует влажности ТМ СТ I класса по [5]). Далее производится расчет W_c для заданных исходных условий и полученное значение влажности БИ сравнивается с контрольной точкой на кривых Ооммена или Фабра и Пиччона для проверки правильности расчета. Полученное значение W_c будет являться значением влажности БИ в начале эксплуатации СТ.

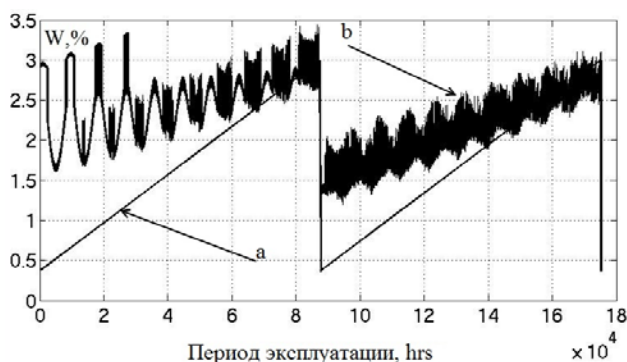


Рис. 3. Тренды влажности БМИ

Предложенные модели реализованы в программе Matlab Simulink. В качестве примера для оценки работоспособности модели проведено моделирование износа БМИ для двух вариантов динамики влажности в системе БИ – ТМ.

В первом варианте значение влажности в течение моделирования возрастает линейно и понижается до некоторого начального значения после ТО СТ (рис. 3, кривая *a*). Во втором варианте применен тренд влажности, полученный в результате использования предложенной модели (рис. 3, кривая *b*).

Исходные данные для моделей ФЭ, ТС БМИ и ТО и ТДМ: номинальный ток трансформатора равен 406 А, мощность потерь холостого хода равно 29,3 кВт, максимальное значение кислотности ТМ равно 0,29 мг КОН/г, базовое значение кислотности ТМ 0,2 мг КОН/г, среднегодовая температура окружающей среды 9,4 °С, амплитуда годового изменения среднесуточной температуры θ_a равна 12,6 °С, амплитуда суточного изменения θ_a равна 4 °С, коэффициент изменения среднегодовой θ_a равен 2 °С, коэффициент изменения среднегодового I_d 2 А, среднесуточное изменение I_d 20 А, среднегодовое изменение I_d 20 А, $I_d = 244,2$ А, максимально допустимое значение ТННТ принято равным 150 °С, максимально допустимое значение влагосодержания бумажной изоляции – 5%.

Исходные данные для построения тренда влажности рис. 3, кривая *a*: базовое значение влагосодержания БИ равно 0,37 %, максимальное значение влагосодержания БИ 3 %.

Исходные данные для построения тренда влажности рис. 3, кривая *b*: содержание ароматических углеводородов в масле $C_A = 17$ % (масло Т-750 ГОСТ 982-80), $A = 5,55$, $B = 0,034$, $k = 0,49$, $a = -0,0007$ (электротехнический картон ЭМЦ).

Период моделирования – 20 лет. Результаты моделирования при определенных выше исходных данных приведены на рис. 4. По оси абсцисс откладывается срок службы СТ в часах, а по оси ординат – величина израсходованного ресурса L , также в часах.

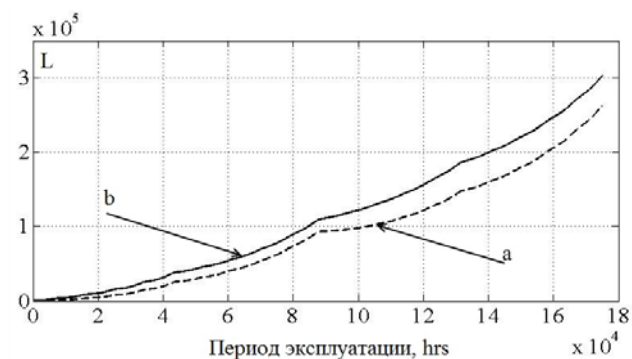


Рис. 4. Результаты моделирования

Из полученных результатов видно, что применение разных вариантов тренда влажности БИ оказывает значительное влияние на конечное значение израсходованного ресурса. Так, износ СТ в случае тренда рис. 3, *a* составил 30,03 лет за 20 лет эксплуатации а в случае рис. 3, *b* – 34,6 лет.

Выводы.

Предложена модель влагообмена в системе «бумажная изоляция – трансформаторное масло» во взаимосвязи с другими моделями, описывающими состояние силового трансформатора в эксплуатации: моделью факторов эксплуатации, термодинамической моделью силового трансформатора и моделью технического состояния бумажно-масляной изоляции.

Предложенная модель позволяет строить детализированный тренд динамики влажности бумажно-масляной изоляции по данным мониторинга единичного силового трансформатора или по результатам моделирования изменения эксплуатационных параметров силового трансформатора.

Учет динамики влагосодержания бумажно-масляной изоляции силового трансформатора позволяет повысить точность оценки ресурса бумажной изоляции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экспертная система мониторинга, диагностики и управления трансформаторным оборудованием «ЭСМДУ ТРАНС» производства ПАО «ЗТР». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ztr.com.ua/ru/monitoring-system>.
2. Русов В.А., Овсянников А.Г., Живодерников С.В. Зарубежный опыт мониторинга состояния маслонаполненного оборудования // Материалы IV научн.-практ. семинара Общественного совета специалистов Сибири и Востока по проблемам мониторинга трансформаторного оборудования и диагностики электрических установок, 20-24 апреля 2009 г., Новосибирск: ГЦРО, 2009. – С. 7-22.
3. Cheng J., Robalino D., Werelius P., Ohlen M. Advanced technique for moisture condition assessment in power transformers // Journal of International Council on Electrical Engineering. – 2014. – vol.4. – no.3. – pp. 185-191. doi: 10.5370/JICEE.2014.4.3.185.
4. Мордкович А.Г., Туркот В.А. Система управления, мониторинга и диагностики трансформаторного оборудования СУМТО // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2007. – №6. – С. 23-28.
5. Силовые трансформаторы. Справочная книга / Под ред. Лизунова С.Д., Лоханина А.К. – М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с.
6. Поляков М.А., Василевский В.В. Prediction of wearing out of power transformer winding insulation // Технічна електродинаміка. – 2014. – №5. – С. 65-67.
7. Du Y., Zahn M., Lesieutre B.C., Mamishev A.V., Lindgren S.R. Moisture equilibrium in transformer paper-oil systems // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 1999. – vol.15. – no.1. – pp. 11-20. doi: 10.1109/57.744585.

REFERENCES

1. *E'kspertnaya sistema monitoringa, diagnostiki i upravleniya transformatornym oborudovaniem «E'SMDU TRANS» proizvodstva PAO «ZTR»* (Expert system for monitoring, diagnostic and control of transformer equipment «E'SMDU TRANS» produced by PAO «ZTR») Available at: <http://www.ztr.com.ua/ru/monitoring-system>. (accessed 13 May 2014). (Rus).
2. Rusov, V.A., Ovsyannikov, A.G., Zhivodernikov S.V. 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 monitor-

- ing of transformer equipment and diagnostics of electrical installations]. Novosibirsk, Russia, 20-24 April 2009, pp. 7-22. (Rus).
3. Cheng J., Robalino D., Werelius P., Ohlen M. Advanced technique for moisture condition assessment in power transformers. *Journal of International Council on Electrical Engineering*, 2014, vol.4, no.3, pp. 185-191. doi: 10.5370/JICEE.2014.4.3.185.
4. Mordkovich A.G. The system of management, monitoring and diagnostics of transformers SUMTO. *ELEKTRO. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaja promyshlennost' – ELEKTRO. Electrical engineering, power industry, electrical industry*, 2007, no.6, pp. 23-28. (Rus).
5. Lizunov S.D., Lokhanin A.K. *Silovye transformatory. Spravochnaja kniga* [Power transformers. Handbook]. Moscow, Energoizdat Publ., 2004. 616 p. (Rus).
6. Polyakov M.A., Vasilevskij V.V. Prediction of wearing out of power transformer winding insulation. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamic*, 2014, no.5, pp. 65-67.
7. Du Y., Zahn M., Lesieutre B.C., Mamishev A.V., Lindgren S.R. Moisture equilibrium in transformer paper-oil systems. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 1999, vol.15, no.1, pp. 11-20. doi: 10.1109/57.744585.

Поступила (received) 04.02.2016

Василевский Владимир Валентинович, аспирант, Запорожский национальный технический университет, 69063, Запорожье, ул. Жуковского, 64, тел/phone +380 50 8893073, e-mail: Lisses@ukr.net

V.V. Vasilevskij

¹Zaporozhye National Technical University, 64, Zhukovsky Str., Zaporozhye, 69063, Ukraine.

Dynamics model of moisture in paper insulation-transformer oil system in non-stationary thermal modes of the power transformer.

Introduction. An important problem in power transformers resource prognosis is the formation of moisture dynamics trends of transformer insulation. **Purpose.** Increasing the accuracy of power transformer insulation resource assessment based on accounting of moisture dynamics in interrelation with temperature dynamics. Working out of moisture dynamics model in paper insulation-transformer oil system in conjunction with thermodynamic model, load model and technical maintenance model. **Methodology.** The mathematical models used for describe the moisture dynamics are grounded on nonlinear differential equations. Interrelation moisture dynamics model with thermodynamic, load and technical maintenance models described by UML model. For confirming the adequacy of model used computer simulation. **Results.** We have implemented the model of moisture dynamics in power transformers insulation in interrelation with other models, which describe the state of power transformer in operation. The proposed model allows us to form detailed trends of moisture dynamics in power transformers insulation basing on monitoring data or power transformers operational factors simulation results. We have performed computer simulation of moisture exchange processes and calculation of transformer insulation resource for different moisture trends. **Originality.** The offered model takes into account moisture dynamics in power transformers insulation under the influence of changes of the power transformers thermal mode and operational factors. **Practical value.** The offered model can be used in power transformers monitoring systems for automation of resource assessment of oil-immersed power transformers paper insulation at different phase of lifecycle. Model also can be used for assessment of projected economic efficiency of power transformers exploitation in projected operating conditions. References 7, figures 4.
Key words: oil-paper insulation, power transformer, computer model, moisture dynamics.