



УДК 621.315.6

## ОЦЕНКА РАСХОДА РЕСУРСА БУМАЖНОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА



### EVALUATION OF PAPER INSULATION RESOURCES FOR POWER TRANSFORMER

**Багаутдинова Л.З.**

Казанский государственный  
энергетический университет  
lecia\_90@mail.ru

**Bagautdinova L.Z.**

Kazan State Energy University  
lecia\_90@mail.ru

**Аннотация.** Актуальной задачей в ситуации износа силового трансформаторного оборудования является прогнозирование ресурса изоляции. Автором ведутся исследования по известной методике с помощью моделирования, которое позволяет спрогнозировать износ изоляции на длительный срок.

**Annotation.** An urgent task in the situation of power transformer equipment wear is to predict the insulation resource. The author conducts research on a well-known method using modeling, which allows you to predict the wear of insulation for a long time.

**Ключевые слова:** интеграл старения, силовой трансформатор, износ изоляции, прогноз, модели технического состояния и факторов эксплуатации.

**Keywords:** aging integral, power transformer, insulation wear, forecast, models of the technical condition and operating factors.

Для силовых трансформаторов (СТ) – актуальной научно-технической задачей является оценка текущего состояния и прогнозирование остаточного ресурса трансформаторного оборудования. При сроке службы силового трансформатора состояние изоляции является определяющим фактором. В процессе эксплуатации бумажно-масляная изоляция подвергается влиянию повышенной температуры, увлажнению, окислению. Эти факторы оказывают существенное влияние на ее техническое состояние в каждый определенный момент времени, и, соответственно, на срок службы трансформатора [1].

Одним из расчетных методов определения расхода ресурса изоляции обмоток СТ является формула интеграла старения, корректировка которой предложена в работах [1, 2]:

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

где  $L(t_0, t_0 + T)$  – износ изоляции в интервале времени, который начинается в момент  $t_0$  и имеет длительность  $T$ ;  $K, K_{\text{БАЗ}}$  – текущий и базовый показатель кислотности масла, выраженный в мг КОН/г, соответственно;  $W, W_{\text{БАЗ}}$  – текущий и базовый показатель влагосодержания бумажной изоляции, выраженный в % от массы, соответственно;  $\theta_h$  – температура наиболее нагретой точки изоляции выраженная в °С;  $\Delta$  – интервал температур  $\theta_h$ , на котором происходит, при прочих равных условиях, удвоение износа изоляции,  $\Delta = 6$  °С или 7 °С в соответствии с международными и российскими стандартами [3].

Подынтегральное выражение в формуле (1) можно представить в виде:

$$V = V_K * V_W * V_\theta,$$

где  $V$  – относительная скорость старения бумажной изоляции СТ (за единицу принята скорость старения высушенной и пропитанной маслом бумаги с остаточным содержанием влаги 0,3 % и температуре 98 °С [4]);  $V_K$  – относительная скорость старения изоляции, зависящая от степени окисленности трансформаторного масла;  $V_W$  – относительная скорость старения изоляции, зависящая от степени увлажненности бумаги;  $V_\theta$  – скорость термического износа изоляции. Формула (1) справедлива для обычной трансформаторной бумаги. Скорость  $V_\theta$ , вычисляемая по формуле (3), будет отличаться при использовании термически улучшенной бумаги.

При расчетах используются значения для аппроксимации исходных данных с помощью степенной функции от времени  $t$ :

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

Результаты расчетов показали, что при увеличении значения  $W$  при неизменных значениях других исходных данных пропорциональное отношение  $V_W, V_\theta$  и  $V_K$  резко возрастает.



Цель исследования заключается в повышении достоверности оценки расхода ресурса бумажной изоляции СТ. Для достижения поставленной цели необходимо:

- рассмотреть возможность расширения базы исходных данных для оценки скорости старения;
- провести коррекцию формулы интеграла старения;
- выполнить компьютерное моделирование, которое позволит определить разницу в полученных значениях прогнозируемого износа.

Для оценки влияния изменений  $V_W$ ,  $V_\theta$  и  $V_K$  под действием внешних воздействий на СТ в период эксплуатации формулы (1) и (5) реализованы как блок оценки износа ОИ в модели для прогнозирования процессов износа изоляции. Данная модель включает вектора параметров прогноза (ПП), модели факторов эксплуатации (ФЭ), технического обслуживания (ТО), технического состояния (ТС) БИ и ТМ, а также генератор меток времени (МВ).

Модель ТС БИ построена на основе уравнения теплового баланса СТ. Она позволяет определить тренд температуры  $\theta_h$  на основании трендов тока нагрузки  $I_d$ , температуры охлаждающей среды  $\theta_a$  и бинарной переменной управления охлаждения «РЕЖИМ ОХЛ.». Параметрами модели ТС БИ являются напряжение нагрузки  $U_d$ , потери  $P_{xx}$  холостого хода. По результатам тепловых испытаний расчетным путем определяются следующие параметры СТ: теплоемкость  $C$ , тепловое сопротивление «СТ – внешняя среда» в режимах естественного  $R_N$  и принудительного  $R_F$  охлаждения.

Модель ТС ТМ выполняет расчет трендов показателей  $W$  и  $K$  на основе экспертных оценок [4] по формулам:

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

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

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 ФЭ прогнозирует уровень тока  $I_d$  и температуры  $\theta_a$ . В качестве модели температуры охлаждающей среды  $\theta_a$  использована двойная синусоидальная функция [3], которая дополнена компонентой многолетних климатических изменений.

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:

$$I_d = P_\Gamma * I_{\Gamma av} * N_\Gamma + \Delta I_{d\Gamma} * P_c(N_{d\Gamma}) * \Delta I_{dc} * P_d(N_c),$$

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

Для расчета прогнозируемого тренда тока  $I_d$  используются следующие исходные данные:

$$P_\Gamma = 0,000415; I_{\Gamma av} = 244,2 \text{ A}; \Delta I_{dc} = 20 \text{ A}; \Delta I_{d\Gamma} = 20 \text{ A}.$$

Модель ТО формирует команды на включение охлаждения РЕЖИМ ОХЛ и техническое обслуживание масла ТО основываясь на входных данных уставки охлаждения  $\theta_0$  и режимах ТО ТМ (плановое, по техническому состоянию), базовых показателях ТМ ( $K_{БАЗ}$ ,  $W_{БАЗ}$ ) а также выходных данных модели ТС ( $\theta_h$ ,  $W$ ,  $K$ ). В контуре регулирования температуры модель ТО содержит релейный регулятор. В контуре ТО ТМ модель ТО содержит блоки сравнения текущего модельного времени с временем планового ТО; текущих значений  $W$ ,  $K$  с максимально допустимыми  $W_{max}$ ,  $K_{max}$ .

Команда ТО представляет собой логическое ИЛИ перечисленных результатов сравнения. По этой команде текущие значения  $K$  и  $W$  в блоке ТС ТМ уменьшаются до  $K_{БАЗ}$ ,  $W_{БАЗ}$ .

С использованием формул (1) проведено компьютерное моделирование расхода ресурса изоляции СТ в течение предстоящих десяти лет эксплуатации.

По данной методике автором ведутся исследования для трансформатора ТДЦ 125 000/110 со сроком эксплуатации более 25 лет.

Проведенное моделирование по уточненной формуле интеграла старения показало снижение влияния влажности при высоких ее содержаниях ( $W \geq 3\%$ ) на износ изоляции СТ на 45%. Однако из-за того, что в таких условиях СТ работает 10–20% процентов времени, снижение износа  $L$  составляет 22,4%.

Полученные значения в большей степени отвечают практическому опыту эксплуатации СТ. Использование дополнительных данных для моделирования скорости старения бумажной изоляции существенно изменяет полученные результаты. Компьютерная модель износа изоляции с применением



уточненной формулы позволяет выполнить моделирование износа изоляции в течение 25 лет эксплуатации и провести сравнительный анализ полученных результатов, который показал фактическое уменьшение износа.

### Литература

1. Василевский В.В. Оценка расхода бумажной изоляции силового маслонаполненного трансформатора с помощью уточненной формулы интеграла старения // ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА. – Издательство: Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»(Харьков) ISSN: 2074-272XeiSSN: 2309-3404; Електротехніка і електромеханіка. – 2015 – № 1. – С. 16–19.
2. Васин В.П., Долин А.П. Ресурс изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов // Электро. – 2008. – № 3. – С. 12–17.
3. Васин В.П., Долин А.П. К задаче оценки остаточного ресурса изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов // Новое в российской электроэнергетике. – 2008. – № 3. – С. 42–55.
4. Васин В.П., Долин А.П. Ресурс изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2008. – №3. – С. 12–17.
5. IEC 60076-7 Ed. 1: Power transformers – Part 1: Loadin guide for oil-immersed power transformers. Vol. 14/512/FDIS. Sept. 2005.

### References

1. Vasilevsky V.V. Estimation of paper insulation consumption of a power oil-filled transformer using a refined formula of the integral of aging // ELECTROMECHANIKA. – Publishing House: National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute» (Kharkov) ISSN: 2074-272XeiSSN: 2309-3404; Electrical engineering and electrical engineering. – 2015 – № 1. – P. 16–19.
2. Vasin V.P., Dolin A.P. Insulation resource of power oil-filled transformers // Electro. – 2008. – № 3. – P. 12–17.
3. Vasin V.P., Dolin A.P. To the task of assessing the residual insulation resource of power oil-filled transformers // New in the Russian electric power industry. – 2008. – № 3. – P. 42–55.
4. Vasin V.P., Dolin A.P. Insulation resource of power oil-filled transformers // ELECTRO. Electrical engineering, electric power industry, electrical industry. – 2008. – № 3. – P. 12–17.
5. IEC 60076-7 Ed. 1: Power transformers – Part 1: Loadin guides for oil-immersed power transformers. Vol. 14/512 / FDIS. Sept. 2005.