

ОЦЕНКА РАСХОДА РЕСУРСА БУМАЖНОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВОГО МАСЛОНАПОЛНЕННОГО ТРАНСФОРМАТОРА С ПОМОЩЬЮ УТОЧНЕННОЙ ФОРМУЛЫ ИНТЕГРАЛА СТАРЕНИЯ

Запропоновано уточнення формули інтегралу старіння. Розроблено комп'ютерну модель зносу ізоляції з використанням уточненої формули. Виконано моделювання зносу ізоляції потужного трансформатору впродовж наступних десяти років експлуатації. Бібл. 4, табл. 4, рис. 3.

Ключові слова: інтеграл старіння, силовий трансформатор, знос ізоляції, прогноз, моделі технічного стану та факторів експлуатації.

Предложено уточнение формулы интеграла старения. Разработана компьютерная модель износа изоляции с использованием уточненной формулы. Выполнено моделирование износа изоляции силового трансформатора в течение следующих десяти лет эксплуатации. Библ. 4, табл. 4, рис. 3.

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

Введение. Силовой трансформатор (СТ) – один из важнейших элементов систем электроснабжения. Оценка текущего состояния и прогнозирование остаточного ресурса трансформаторного оборудования является актуальной научно-технической задачей, особенно учитывая общую тенденцию старения трансформаторного парка Украины. Срок службы трансформатора в большой степени определяется состоянием его изоляции. В процессе эксплуатации бумажно-масляная изоляция подвергается влиянию повышенной температуры, увлажнению, окислению. Эти факторы оказывают влияние на ее техническое состояние в каждый определенный момент времени, и, соответственно, на срок службы трансформатора.

В настоящее время большое внимание уделяется внедрению систем непрерывного контроля, в частности, систем непрерывного контроля состояния изоляции СТ. Такие системы позволяют осуществлять контроль параметров изоляции в реальном времени. Базируясь на полученных данных возможно спрогнозировать расход ресурса изоляции в течение предстоящих лет эксплуатации.

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

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

где $L(t_0, t_0 + T)$ – износ изоляции в интервале времени, который начинается в момент t_0 и имеет длительность T ; K , $K_{\text{БАЗ}}$ – 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; θ_h – температура наиболее нагретой точки изоляции выраженная в °С; Δ – интервал температур θ_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:

$$V = V_K \cdot V_W \cdot V_\theta, \quad (2)$$

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_θ – скорость термического износа изоляции. Формула (1) справедлива для обычной трансформаторной бумаги. Скорость V_θ , вычисляемая по формуле (3), будет отличаться при использовании термически улучшенной бумаги.

Зависимость скорости старения от значения влажности выводится авторами [1, 2] на основе двух точек, полученных из графика 19.12 [4]. Значению $W = 0,3$ % соответствует значение скорости износа $V_W = 1$, а при $W = 1,0$ % скорость износа увеличится в 6 раз, то есть $V_W = 6$. В частности, эти значения используются для аппроксимации исходных данных с помощью степенной функции от времени t :

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

Недостатком формулы (3) является то, что значения аппроксимации, полученные в одном интервале, используются для вычислений вне этого интервала. При этом вклад фактора W в величину расхода L преобладает над остальными. В качестве примера можно принять значение кислотного числа масла K , равным 0,15 мг КОН/г (что соответствует значению ограничивающему область нормального состояния по ГОСТ 5985-79). Влажность бумажной изоляции W изменяется от 0,3 % (допустимое содержание влаги в новой высушенной изоляции) до 5 % (в соответствии

с РД 34.45-51.300-97 "Объем и нормы испытания электрооборудования" 4 % является допустимым значением влажности СТ находящегося в эксплуатации). Значения $K_{БАЗ}$ и $W_{БАЗ}$ равны, соответственно, 0,1 мг КОН/г и 0,3 %. Температура наиболее нагретой точки θ_h принята равной 104 °С. В соответствии с таблицей, приведенной в [3] относительная скорость износа изоляции при такой температуре увеличивается вдвое. Результаты расчета факторов V_W , V_θ и V_K по формуле (1) для приведенных значений представлены в табл.1.

Расчет скорости износа

$W, \%$	V_W	$K, \text{мг КОН/г}$	V_K	$\theta_h, \text{°C}$	V_θ
0,3	1	0,15	2,29	104	2
1	6,03	0,15	2,29	104	2
1,5	11,05	0,15	2,29	104	2
2	16,98	0,15	2,29	104	2
3	31,117	0,15	2,29	104	2
4	47,811	0,15	2,29	104	2
5	66,7	0,15	2,29	104	2

Из полученных результатов видно, что при увеличении значения W при неизменных значениях других исходных данных пропорциональное отношение V_W к V_θ и V_K резко возрастает. При $W=5\%$ V_W превышает значение V_K в 29,12 раз, а значение V_θ – в 33,35 раза.

Задача исследования. 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

Методы и результаты. Для корректировки зависимости скорости старения от влажности бумаги используем третью точку – в [4] указано, что если

принять скорость старения при влажности 0,3 % за 1, то при 1 % влажности скорость старения увеличивается в 6-16 раз, а при 4 % – в 12-45 раз. Эти данные можно представить в виде таблицы (см. табл. 2).

Данные табл. 2 для значений скорости старения могут быть аппроксимированы с помощью экспоненциальной, степенной, линейной, логарифмической функций, коэффициенты которых приведены в табл. 3.

Таблица 2

Исходные данные		
Влажность, %	Диапазон оценок скорости старения по [4].	Усредненное значение
0,3	1	1
1,0	6-16	11
4,0	12-45	28,5

Как видно из табл. 3 наибольшее значение величины достоверности R может быть получено при использовании логарифмической функции. Для дальнейших расчетов примем функцию, полученную для усредненных значений:

$$V_W = 10.66 \ln(Wt) + 12.85, \quad (4)$$

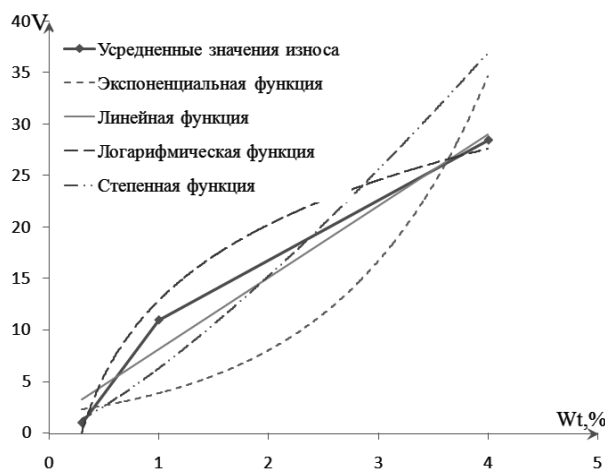


Рис. 1. Результаты аппроксимации усредненных значений зависимости скорости износа СТ от степени увлажнения бумажной изоляции

Таблица 3

Результаты аппроксимации значений зависимости скорости износа СТ от степени увлажнения бумажной изоляции

Функция	Общий вид функции	a			b			Величина достоверности R^2		
		Минимальные	Максимальные	Усредненные	Минимальные	Максимальные	Усредненные	Минимальные	Максимальные	Усредненные
Экспоненциальная	$y = ae^{bx}$	1,601	2,086	1,869	0,540	0,825	0,730	0,686	0,679	0,691
Линейная	$y = ax + b$	2,683	11,23	6,956	1,592	0,827	1,210	0,917	0,973	0,964
Логарифмическая	$y = a \ln(x) + b$	4,248	17,08	10,66	6,075	19,62	12,85	0,999	0,980	0,986
Степенная	$y = a \cdot x^b$	3,927	8,206	6,285	0,947	1,451	1,278	0,917	0,913	0,921

Подставив имеющиеся значения поочередно в формулы (3) и (4) можно рассчитать значения скорости износа и оценить отклонения, полученные при применении предложенной формулы (табл. 4). Из табл. 4 видно, что полученные с использованием

предложенной методики значения скорости износа значительно отличаются от значений, полученных с помощью формулы (3).

Для дальнейших исследований примем формулу интеграла старения, имеющую следующий вид:

$$L(t_0, t_0 + T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0 + T} \left(\frac{K}{K_{\text{БАЗ}}} \right)^{2,05} \times (10,66 \ln(W_t) + 12,85) \cdot \exp\left[\ln 2 \cdot \frac{(\theta_h - 98)}{\Delta}\right] dt. \quad (5)$$

Таблица 4

Результаты расчета скорости износа по (3) и (4)

Результаты по (3)		Результаты по (4)		Отклонение в % при применении (4)
$W, \%$	V_W	$W, \%$	V_W	
0,3	1	0,3	0,015	98,5
1	6	1	12,85	114,16
4	47,2	4	27,62	41,48

Для оценки влияния изменений V_K , V_W , и V_θ 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, структурная схема которой приведена на рис. 2. Кроме этого данная модель содержит 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 θ_h на основании трендов тока нагрузки I_d , температуры охлаждающей среды θ_a и бинарной переменной управления охлаждением "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. Для расчетов применяются исходные данные, полученные из практического опыта эксплуатации: тепловое сопротивление "СТ – внешняя среда" в режиме естественного охлаждения $R_N = 0,0585$ К/Вт, в режиме принудительного охлаждения $R_F = 0,18239$ К/Вт; теплоемкость $C = 0,00039$ К/Вт.

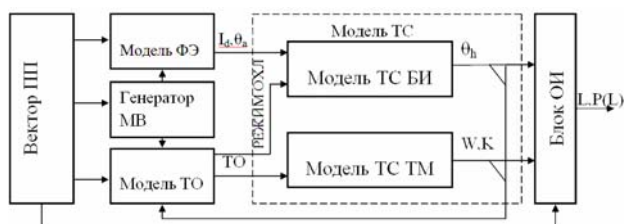


Рис. 2. Структурная схема модели

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

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

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

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.

Для определения коэффициентов формул (6) и (7) используются данные, приведенные в табл. 22.1 [4]. Влажность в бумажной изоляции возрастает линейно от $W_{\text{БАЗ}} = 0,3 \%$ до $W = 4 \%$ в течение 2,5 лет. Кислотное число возрастает от $K_{\text{БАЗ}} = 0,1$ мг КОН/г до $K = 0,245$ мг КОН/г в течение такого же периода. В ходе обслуживания бумажная изоляция и трансформаторное масло подвергаются сушке и дегазации, после чего восстанавливаются исходные значения влажности и кислотности.

Модель ФЭ синтезирует прогнозируемый тренд тока I_d и температуры θ_a . В качестве модели температуры охлаждающей среды θ_a использована двойная синусоидальная функция [3], которая дополнена компонентой многолетних климатических изменений. При этом приняты следующие исходные данные для расчета температуры охлаждающей среды θ_a : амплитуда годового изменения среднесуточной $\theta_a A = 12,6$ °С; амплитуда суточного изменения $\theta_a B = 4$ °С.

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:

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

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

Для расчета прогнозируемого тренда тока I_d используются следующие исходные данные: $P_z = 0,000415$; $I_{zav} = 244,2$ А; $\Delta I_{dc} = 20$ А; $\Delta I_{dc} = 20$ А.

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

С использованием формул (1) и (5) проведено компьютерное моделирование расхода ресурса изоляции СТ в течение предстоящих десяти лет эксплуатации.

Результаты моделирования при определенных выше исходных данных представлены на рис. 3. По оси абсцисс откладывается срок службы СТ в часах, а по оси ординат – величина износа L , также в часах.

Проведенное моделирование по уточненной формуле интеграла старения показало снижение влияния влажности при высоких ее содержаниях ($W \geq 3\%$) на износ изоляции СТ на 50%. Однако из-за того, что в таких условиях СТ работает 10-20% процентов времени, снижение износа L составляет 26,4%. Полученные значения в большей степени отвечают практическому опыту эксплуатации СТ.

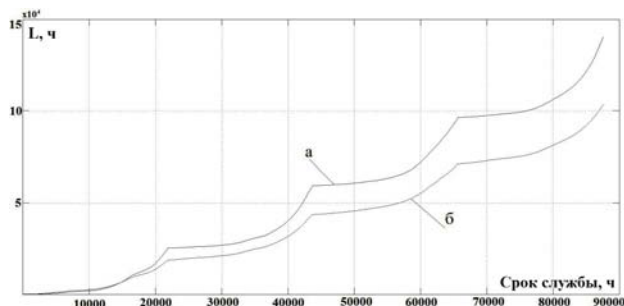


Рис. 3. Результаты моделирования:

- а – моделирование износа бумажной изоляции силового трансформатора базированное на формуле (1);
б – моделирование износа бумажной изоляции, базированное на формуле (5)

Выводы.

Проведенная работа показала, что использование дополнительных данных для моделирования скорости старения бумажной изоляции существенно изменяет полученные результаты.

Предложена уточненная формула интеграла старения. Разработана компьютерная модель износа изоляции с применением уточненной формулы, выполнено моделирование износа изоляции в течение десяти лет эксплуатации и проведен сравнительный анализ полученных результатов, который показал фактическое уменьшение износа.

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. Васин В.П., Долин А.П. Ресурс изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2008. – №3. – С. 12-17.

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

4. Силовые трансформаторы. Справочная книга / Под. ред. Лизунова С.Д., Лоханина А.К. – М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с.

REFERENCES

1. Vasin V.P., Dolin A.P. On the problem of residual life assessment of power oil-filled transformers insulation. *Novoe v rossiiskoi elektroenergetike – New in Russian Power Industry*, 2008, no.3, pp. 42-55. (Rus).
2. Vasin V.P., Dolin A.P. Resource of power oil-filled transformers insulation. *ELEKTRO. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaja promyshlennost' – ELEKTRO. Electrical engineering, power industry, electrical industry*, 2008, №3. pp. 12-17. (Rus).
3. IEC 60076-7 Ed. 1: Power transformers – Part 1: Loading guide for oil-immersed power transformers. Vol. 14/512/FDIS.
4. Lizunov S.D., Lokhanin A.K. *Silovye transformatory. Spravochnaia kniga* [Power transformers. Handbook]. Moscow, Energoizdat Publ., 2004. 616 p. (Rus).

Поступила (received) 28.10.2014

Василевский Владимир Валентинович, аспирант,
Запорожский национальный технический университет,
69063, Запорожье, ул. Жуковского, 64,
тел/phone +38 050 8893073, e-mail: Lisses@ukr.net

V.V. Vasilevskij

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

Assessment of the resource consumption of oil-filled power transformer paper insulation based on updated aging integral.
Refinement of the aging integral formula is proposed. A computer model of insulation wearing out is developed using refined formula. Computer simulation of power transformer insulation wearing out over the next ten years of life is carried out. References 4, tables 4, figures 3.

Key words: aging integral, power transformer, insulation wearing out, prognosis, models of technical condition and operating factors.