

Интернет-журнал «Наукovedение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 7, №2 (2015) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol7-2>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/05TVN215.pdf>

DOI: 10.15862/05TVN215 (<http://dx.doi.org/10.15862/05TVN215>)

УДК 621.3.05

Петров Виктор Степанович

ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Россия, Москва

Филиал в г. Смоленске

Кандидат технических наук, доцента

E-mail: sfmei_ees@mail.ru

Разработка математической модели прогнозирования надежности силовых трансформаторов

Аннотация. Рассматривается математическое моделирование прогнозирования и оценки надёжности одного из основных элементов электроэнергетических систем и систем электроснабжения – трансформаторов. При моделировании математической модели надёжности трансформаторов использована теория подобия и моделирования. Материал статьи соответствует основным принципам и положениям научной школы в теории подобия и моделирования, созданной профессором В.А. Вениковым.

Математическая модель разработана на основе известного уравнения Монтзингера, связывающего срок службы трансформатора с температурой его обмоток и характеристиками изоляции этих обмоток.

Полученная критериальная модель надёжности трансформаторов представляет зависимость относительного износа изоляции обмоток трансформатора от относительного значения тока нагрузки в стационарном режиме работы.

Приведены расчёты относительного износа изоляции от тока нагрузки, что позволило получить зависимость износа изоляции (величины обратной сроку службы) от тока нагрузки. В эксплуатации это наиболее удобно, так как токи нагрузки контролируются соответствующими приборами при работе трансформаторов, а температура измеряется эпизодически.

Полученная критериальная модель, использующая относительные единицы позволяет оценить сразу количественно изменение износа изоляции в относительных единицах или процентах без знания действительной их величины в именованных единицах. Даны примеры использования полученной модели.

Разработанная модель в литературе не встречается, а удобство её применения для анализа и расчетов доказывается приведенными примерами.

Ключевые слова: трансформатор; надёжность; прогнозирование; подобие; моделирование; эквивалентирование; изоляция; нагрев; электроснабжение.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Петров В.С. Разработка математической модели прогнозирования надёжности силовых трансформаторов // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №2 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/05TVN215.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/05TVN215

Трансформатор, как известно [1, 2], является одним из основных элементов систем электроснабжения, надежность функционирования которого достаточно высока и определяется в большей мере надежностью работы его обмоток. Поэтому для прогнозирования показателей надежности трансформаторов целесообразно использовать моделирование, основанное на применении методов эквивалентирования и теории подобия. Модель износа изоляции обмоток трансформатора в стационарном режиме получена на основе известного [1, 2] уравнения Монтзингера:

$$T = Ve^{-\alpha\theta}, \quad (1)$$

где T – срок службы, θ – температура, V – и α – коэффициенты, зависящие от свойств материала изоляции. [1, 2].

На основании опытов [1, 2, 11] было установлено, что для изоляционных материалов класса нагревостойкости А (изоляция целлюлозная, пропитанная маслом) $\alpha=0,0866$. Тогда $V=9,4 \cdot 10^4$ года, что соответствует восьмиградусному правилу, широко используемому в тепловых расчетах трансформаторов, и принятому сроку службы изоляции того же класса нагревостойкости А по ГОСТ 11677-75 равному 25 годам при температуре наиболее горячей точки обмотки 95°C . Старение изоляции ε_θ , т.е. её износ, есть величина обратная сроку службы изоляции, пропорциональная времени эксплуатации t :

$$\varepsilon_\theta = \frac{t}{T} = \left(\frac{t}{V}\right) e^{\alpha\theta}. \quad (2)$$

Степень старения за любой отрезок времени $t=t_0$ при температуре 95°C считают нормальной:

$$\varepsilon_\theta = \left(\frac{t_0}{V}\right) e^{95\alpha}. \quad (3)$$

Тогда относительная степень старения (относительный износ) представится выражением:

$$\frac{\varepsilon_\theta}{\varepsilon_n} = \left(\frac{t}{t_0}\right) e^{\alpha(\theta-95)}. \quad (4)$$

Как было указано ранее, для построения обобщенных моделей прогнозирования надежности целесообразно использовать теорию подобия [3, 4, 6, 9, 12].

Выражение (4), записанное в безразмерной форме, по своей сути, с точки зрения теории подобия [3], является критериальным, если выполняется требование $\alpha=\text{idem}$ для условий нормальных и отличных от них, в данном случае – по температуре. Необходимость выполнения условия $\alpha=\text{idem}$ накладывается подобием процессов и следует из π -теоремы подобия [3].

Таким образом, используя теорию подобия [3], при $\alpha=\text{idem}$ в критериальной форме (4) примет вид

$$\varepsilon_* = t_* e^{95\alpha(\theta_*-1)}. \quad (5)$$

где $\varepsilon_* = \varepsilon_\theta / \varepsilon_n$; $t_* = t / t_0$; $\theta_* = \theta / 95$.

В частном случае, при рассмотрении износа в разных режимах за одинаковое время $t=t_0$, из (5) получим

$$\varepsilon_* = e^{95\alpha(\theta_*-1)}. \quad (6)$$

При t_0 равном 1 времени (час, сутки, год) t_* численно равно t , тогда:

$$\varepsilon_* = t e^{95\alpha(\theta_*-1)}. \quad (7)$$

Однако следует помнить, что t в (7) величина безразмерная.

Критериальные модели прогнозирования износа изоляции (5)-(7) являются более удобными при анализе, чем применяемые обычно (2), (4), так как позволяют оценить износ без знания фактических значений температуры и времени, а оперируя только их относительными значениями. По (5) можно определить (оценить) так же эквивалентное время работы трансформатора в нормальных условиях при известном износе изоляции в произвольном режиме из выражения:

$$t_{\text{э}} = \varepsilon_* \cdot t_0.$$

Нетрудно показать так же, что полный относительный износ в различных режимах, приведенный к одной базе (режиму) будет определяться суммой относительных износов, приведенных к той же базе (режиму), т.е.

$$\varepsilon_* = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{*i}$$

При полном износе изоляции $\varepsilon_* = 1$.

В практических расчетах целесообразно иметь зависимость ε_* не от относительной температуры θ_* , а от нагрузки, например, от относительного значения тока $I_* = I/I_H$, где I – ток нагрузки в течение времени t ; I_H – номинальный ток трансформатора.

Действительно, при эксплуатации трансформаторов в системах электроснабжения известны, благодаря наличию приборов, электрические параметры нагрузки по току, а не температуре элементов трансформатора. В литературе же не встретилось подобных соотношений между износом изоляции и током нагрузки для различных режимов работы.

Выведем аналитическое выражение зависимости износа изоляции от тока нагрузки. С этой целью были выполнены расчеты зависимостей срока службы от относительного значения тока I_* по выражению (1).

Расчеты сведены в табл.1, где за базисные взяты значения величин при токе, равном номинальному, т.е. $I_* = 1$. Температура обмотки в наиболее горячей точке $\theta_{\text{об. max}} = \theta_{\text{об. ср.}} + 10^{\circ}\text{C}$, принято по [1].

Использование относительных значений I_* позволяет сразу оценить количественно изменение износа ε_* в относительных единицах или в % без знания действительной их величины в именованных единицах.

Из табл.1 видна тенденция изменения температуры обмотки $\theta_{\text{об. ср.}}$ при работе с постоянной загрузкой I_* .

Таблица 1

Расчетные данные температур и срока службы при температуре воздуха $\theta_0=20^{\circ}\text{C}$

I_*	ξ	$\tau_m, ^{\circ}\text{C}$	$\tau_{0-m}, ^{\circ}\text{C}$	$\theta_m, ^{\circ}\text{C}$	$\theta_{об.ср.}, ^{\circ}\text{C}$	T, лет	ε^* при $t=t_0$,
0,7	0,917	25,13	13,18	45,13	58,31	255	$9,9 \times 10^{-2}$
0,8	0,940	29,43	16,65	49,43	66,08	130	$1,9 \times 10^{-1}$
0,9	0,968	34,37	20,58	54,37	74,95	60,64	$4,1 \times 10^{-1}$
0,95	0,984	37,10	22,73	57,10	79,83	39,76	$6,3 \times 10^{-1}$
1,00	1,0	40	25	60	85	25	1,0
1,05	1,017	43,10	27,40	63,10	90,50	15,81	1,58
1,10	1,035	46,34	29,93	66,34	96,27	9,60	2,6
1,15	1,054	49,82	32,62	69,82	102,44	5,65	4,4
1,20	1,074	53,48	35,45	73,48	108,93	3,20	7,8
1,25	1,096	57,38	38,45	77,38	115,83	1,79	13,9
1,30	1,119	61,54	41,63	81,54	123,17	0,94	26,6
1,35	1,143	65,88	44,95	85,88	130,83	0,48	52,1
1,40	1,168	70,52	48,49	90,52	139,00	0,23	$1,1 \times 10^2$

$I_* = I/I_H$ – относительное значение тока нагрузки (коэффициент загрузки; $\xi=r_0/r_{\theta_n}$ – отношение сопротивлений при температурах θ и θ_n ; τ_m, τ_{0-m} – превышения температур масла над воздухом и обмотки над маслом, соответственно; θ_m – температура масла; $\theta_{об.ср.}$ – температура обмотки; T – срок службы, лет.

Так, например, при загрузке $I_*=0,7$ температура обмотки $\theta_{об.ср.}=58,3^{\circ}\text{C}$ и срок службы составит T=255 лет или в 10,2 раза больше, чем при $I_* = 1,0$.

В то же время абсолютная величина T=255 лет является слишком большой и значительно превосходит не только нормируемый срок службы трансформаторов, а и срок его морального старения. Следовательно, постоянно эксплуатировать трансформатор с такой загрузкой нецелесообразно. Из полученных данных табл.1 можно заключить, что целесообразной постоянной загрузкой трансформатора следует считать величину равную загрузке $I_* = 1,0 \pm 0,95$, что позволит иметь срок службы, без учета других воздействий, равным 25-40 годам.

Для загрузки больше номинальной срок службы резко сокращается. Так при загрузке $I_*=1,3$ срок службы составит около 1 года. Даже при загрузке $I_*=1,05$, т.е. на 5% больше номинальной, срок службы уменьшается почти в 2 раза по сравнению с нормируемым и составит около 16 лет. Следовательно, работа трансформатора длительно не допустима с перегрузкой более 5%, так как это ведет к значительному сокращению срока службы.

Однако ПТЭ допускают перегрузку до 40% трансформаторов наружной установки. Один час такой перегрузки эквивалентен работе трансформатора в номинальном режиме в течение 107 часов (около 4,5 суток), что следует из (5). За 6 часов такой перегрузки износ будет соответствовать износу при работе с номинальной нагрузкой в течение 642 часов (около 27 суток). С учетом загрузки $I_*=0,7$ перегрузка трансформатора на 40% в течение 5 суток по 6 часов допустима за срок эксплуатации 25 лет не чаще 1 раза в год.

Полученные численные результаты являются дополнением и подтверждением соответствующего пункта ПТЭ и ПУЭ по условиям эксплуатации силовых трансформаторов, одновременно показывают правомочность разработанной критериальной модели (5).

Для разрабатываемой модели проведена кусочная аппроксимация, которая дала следующие результаты:

$$- \text{ на отрезке } I^*=0,6 \div 1,0; \quad \Delta\theta=95(I^*-1), \quad (8)$$

$$- \text{ на отрезке } I^*=1,0 \div 1,4; \quad \Delta\theta=95(I_*^{1,34}-1), \quad (9)$$

где $\Delta\theta=\theta-95$.

Эти зависимости в литературе не встречаются, поэтому для них определены максимальные значения погрешностей для диапазона реально возможных нагрузок, которые составляют на отрезке $I^*=0,6 \div 1,0$ и на отрезке $I^*=1,0 \div 1,4$ не более 10%, что является приемлемым для инженерных расчетов.

Таким образом, при $\alpha=\text{idem}$ по (4), (5) с учетом (8), (9) получим критериальное уравнение износа изоляции трансформатора в рабочих режимах (ниже номинального, номинальном, перегрузки) следующего вида

$$\varepsilon_* = e^{95\alpha(I_*^m-1)}, \quad (10)$$

где m – показатель степени относительного значения тока нагрузки (или, что то же самое, коэффициента загрузки) равный 1,0 при $I_n \leq I$ и 1,34 при $I \geq I_n$.

Полученное критериальное уравнение позволяет определять относительный износ изоляции при известном $\alpha=\text{idem}$ для любой изоляции без знания величин температуры обмоток и коэффициента B (см.(1)), зависящего от свойств изоляционного материала (величина t^* в этом случае либо известна, либо ею задаемся), а зная только нагрузку трансформатора I^* .

Так для случая $t^*=1$ при изменении нагрузки на 20% выше номинальной и $\alpha=0,0866$ по (10) получим $\varepsilon_* = e^{95 \cdot 0,0866(1,2^{1,34}-1)} = 9,74$, т.е. при такой нагрузке срок службы изоляции уменьшится в 9,74 раза. Это же значение позволяет так же оценить эквивалентное время работы трансформатора в нормальном режиме, дающее такой же износ изоляции, что и за время перегрузки. Другими словами, получить цену износу изоляции при перегрузке (недогрузке) определенной продолжительности по отношению к нормальным условиям. Приняв в рассматриваемом примере $t^*=1$ при $t_0=1$ год, получим, что год работы трансформатора в стационарном режиме с нагрузкой $I^*=1,2$ эквивалентен по износу изоляции 9,7 годам его работы с номинальной нагрузкой.

Возможно так же решение и обратной задачи определения величины нагрузки трансформатора по заданному износу изоляции, что весьма важно для расчета допустимых перегрузок трансформаторов при переменном графике нагрузки, считая работу на каждом участке графика нагрузки стационарной, для обеспечения требуемого срока службы изоляции, а, следовательно, и трансформатора в целом.

Покажем это на примере. Пусть требуется определить допустимую перегрузку в течении 1000 ч так, чтобы срок службы трансформатора оставался равным нормированному (25 лет). Износ изоляции в режимах без перегрузки в сумме составляет $\varepsilon_*=0,5$. При заданных условиях допустимый относительный износ изоляции за время перегрузки будет равен $\varepsilon_{*\text{доп}}=1-\varepsilon_*=0,5$. Полученное значение подставляем в (10), откуда путем несложных преобразований получим:

$$I_* = \left[\frac{1}{95\alpha} \left(\frac{\ln \varepsilon_*}{t_*} + 95\alpha \right) \right]^{1/m} = \frac{1}{95 \cdot 0,0866} \left(\ln \frac{0,5 \cdot 8760 \cdot 25}{1000} + 95 \cdot 0,0866 \right)^{1/1,34} = 1,4$$

где $\alpha=0,0866$; $t_0=8760 \cdot 25$ ч.; $t=1000$ ч.; $m=1,34$.

Следовательно, если не вступают в силу технические ограничения, то для рассматриваемых условий можно перегружать трансформатор за все время эксплуатации в течении 1000 ч на 40% при сохранении суммарного нормированного срока службы.

Для тех же условий, но при $\varepsilon_* = 0,7$, т.е. $\varepsilon_{*доп} = 0,3$, получим $I_* = 1,36$, что вполне отражает физический смысл процессов и справедливость модели в этом смысле: при меньшем допустимом износе имеем и меньшее значение перегрузки при одинаковом суммарном времени её воздействия.

Критериальную модель (10) можно использовать и для расчета допустимого времени перегрузки, которая задана. Например, для $\varepsilon_{*доп} = 0,4$ и $I_* = 1,2$ допустимое время равно 1,03 года или 8989 ч.

Как видно из примеров, полученная критериальная модель (10) достаточно удобна для практического применения в эксплуатации, так как не требует измерения или расчета температуры обмоток.

Разработанная модель в литературе не встречается, а удобство её применения для анализа и расчетов доказывается приведенными примерами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боднар В.В. Нагрузочная способность силовых масляных трансформаторов.-М.: Энергоатомиздат, 1983.-176 с.
2. Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. -Л.: Энергия, 1970.-432с.
3. Веников В.А. Теория подобия и моделирования.-М.: Высш.шк. , 1976.-479 с.
4. Петров В.С. Степанов Ю.К. Моделирование надёжности элементов систем электроснабжения методом ускоренных испытаний. Труды МЭИ, вып. 470, Москва, МЭИ, 1980 г. -с.15-24.
5. Голоднов Ю.М. Контроль за состоянием трансформаторов.-М.:Энергоатомиздат, 1988.-88с.
6. Гухман А.А. Введение в теорию подобия.-М.:Высш.шк., 1973.-296с.
7. Михайлов В.В. Надёжность электроснабжения промышленных предприятий. – М.:Энергоиздат, 1982.-152 с.
8. Никифоров В.Ф., Цирель Я.А. Математическая модель надёжности силового трансформатора// Электричество, №6. 1973-с.50-53.
9. Петров В.С. Прогнозирование надёжности ламп накаливания.-Тр. /Моск.энерг.ин-т, 1980 вып. 470, с.41-49.
10. Меламедов И.М. физические основы надёжности.-Л.: Энергия, 1970.-152с.
11. Ермолин Н.П., Жерихин И.П. надёжность электрических машин.-Л.: Энергия, 1976.-248с.
12. Разработка метода критериального программирования для оптимизации режимов электроэнергетической системы Солопов Р.В. Диссертация кандидата технических наук: 05.14.02 / Национальный исследовательский университет МЭИ. Москва, 2013.

Рецензент: Лыготчиков Валерий Валентинович, профессор кафедры электромеханических систем, доктор технических наук, филиал ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске.

Petrov Viktor Stepanovich
National Research University "Moscow Power Engineering Institute"
Russia, Moscow
E-mail: sfmei_ees@mail.ru

Development of mathematical models of reliability prediction of the power transformers

Abstract. This article considers the mathematical model of the prediction and evaluation of reliability of one of the basic elements of electric power systems - transformers. The theory of similarity and simulation was used to create mathematical models of the reliability of transformers. The material complies with the basic principles of the scientific school in the similarity theory and simulation, created by Professor V.A. Venikov.

A mathematical model is based on the well-known equation of Montzingera binding lifetime of the transformer with the temperature of its windings and insulation characteristics of these windings.

This criterion model of the reliability of transformers represents the dependence of the relative insulation deterioration of the transformer's windings from the relative values of the load current in a stationary mode.

In this article the calculations of relative insulation deterioration from the load current are given. It allows to obtain the dependence of insulation deterioration (inverse value of lifetime) from the load current. It is rather convenient in operation, because the load currents of working transformers are always controlled, and the temperature is measured occasionally.

The criterion model using relative units allows to evaluate quantitatively the change of insulation deterioration in relative units or percent without the knowledge of their actual values in the named units. Examples of the use of this model are given.

This model does not occur in the literature, and the convenience of its application in the analysis and calculations proved by the examples.

Keywords: transformer; reliability; prediction; similarity; simulation; equivalenting; insulation; heating; electric power supply.

REFERENCES

1. Bodnar V.V. Nagruzochnaya sposobnost' silovykh maslyanykh transformatorov.-M.: Energoatomizdat, 1983.-176 s.
2. Vasyutinskiy S.B. Voprosy teorii i rascheta transformatorov. -L.: Energiya, 1970.-432s.
3. Venikov V.A. Teoriya podobiya i modelirovaniya.-M.: Vyssh.shk. , 1976.-479 s.
4. Petrov V.S. Stepanov Yu.K. Modelirovanie nadezhnosti elementov sistem elektrosnabzheniya metodom uskorenykh ispytaniy. Trudy MEI, vyp. 470, Moskva, MEI, 1980 g. -s.15-24.
5. Golodnov Yu.M. Kontrol' za sostoyaniem transformatorov.-M.:Energoatomizdat, 1988.-88s.
6. Gukhman A.A. Vvedenie v teoriyu podobiya.-M.:Vyssh.shk., 1973.-296s.
7. Mikhaylov V.V. Nadezhnost' elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy. – M.:Energoizdat, 1982.-152 s.
8. Nikiforov V.F., Tsirel' Ya.A. Matematicheskaya model' nadezhnosti silovogo transformatora// Elektrichestvo, №6. 1973-s.50-53.
9. Petrov V.S. Prognozirovaniye nadezhnosti lamp nakalivaniya.-Tr. /Mosk.energ.in-t, 1980 vyp. 470, s.41-49.
10. Melamedov I.M. fizicheskie osnovy nadezhnosti.-L.: Energiya, 1970.-152s.
11. Ermolin N.P., Zherikhin I.P. nadezhnost' elektricheskikh mashin.-L.: Energiya, 1976.-248s.
12. Razrabotka metoda kriterial'nogo programmirovaniya dlya optimizatsii rezhimov elektroenergeticheskoy sistemy Solopov R.V. Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.14.02 / Natsional'nyy issledovatel'skiy universitet MEI. Moskva, 2013.