

УДК 338.45:621.31(470.22)

## ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ МАКСИМАЛЬНОГО УВЕЛИЧЕНИЯ РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Г. А. Борисов, Т. П. Тихомирова

*Институт прикладных математических исследований  
Карельского научного центра РАН*

В статье обосновывается зависимость срока службы изоляции трансформаторов от их нагрузки. На ее основе сформулирована задача для максимального увеличения суммы сроков службы изоляции параллельно работающих трансформаторов и, как частный случай, для одного трансформатора. Доказано, что максимум достигается полной стабилизацией нагрузки во времени.

Ключевые слова: срок службы изоляции, стабилизация нагрузки, коэффициент нагрузки.

### G. A. Borisov, T. P. Tikhomirova. TASKS AND METHODS FOR MAXIMIZING THE INSULATION RESOURCE OF POWER TRANSFORMERS

The dependence of transformer service life on the load has been substantiated. Relying thereon, the problem for maximizing the sum of service lives of insulation on transformers in parallel operation and, as a specific case, on a single transformer, has been formulated. It is proved that a maximum will be achieved if the load is completely stabilized over time.

Key words: insulation service life, load stabilization, load factor.

---

Ввиду многолетнего дефицита инвестиций преобладающая часть электрооборудования, в том числе и силовые трансформаторы, находится в эксплуатации длительное время и приближается к исчерпанию или исчерпала назначенный ресурс. Так, например, при полном сроке службы силовых трансформаторов, в соответствии с ГОСТом равным 30 годам [1], силовые трансформаторы напряжением 110–330 кВ, работающие в Карелии на подстанциях, принадлежащих Федеральной сетевой компании, находятся в эксплуатации от 7 (Лоухи, Ляскеля) до 49 лет (ПС Древянка), а в среднем 30,4 года. В результате увеличиваются частота и объем их ремонтного обслуживания,

увеличиваются издержки эксплуатации, вероятность отказа и перерыва в электроснабжении потребителей.

У силовых трансформаторов явления, связанные с проблемой их старения, привели в последнее десятилетие к увеличению доли повреждений из-за износа бумажной изоляции. Так, например, у блочных трансформаторов мощностью 63 МВА и более напряжением 110–500 кВ, работающих на электрических станциях с высокими коэффициентами нагрузки, после наработки назначенного ресурса, 45 % общего числа повреждений сопровождается внутренними короткими замыканиями, связанными с возникновением витковых замыканий при

износе изоляции [4]. Следовательно, для длительно работающих трансформаторов обостряется необходимость найти щадящие режимы при их дальнейшей эксплуатации, максимально продлевающие наработку оставшегося ресурса (срока службы) их изоляции.

Эффект старения используется для описания первичных изменений изоляции, например, химического состава вследствие реакции старения или диффузии. Эти изменения происходят под воздействием термического фактора [2] и влияют на ее срок службы [3], количественно определяемый законом Аррениуса.

Для силовых трансформаторов с бумажной изоляцией класса А ее нагревостойкости срок службы изоляции конкретно определяется зависимостью [3]

$$T = 1,5 \cdot 10^4 \exp[-0,088(\nu_{oc} + \Delta\nu_n)], \quad (1)$$

где  $\nu_{oc}$  – температура окружающей среды, °С;  $\Delta\nu_n$  – превышение температуры изоляции над температурой окружающей среды, °С.

В соответствии с формулой (1) у изоляции обмоток выбирается предельно допустимая температура нагрева в зависимости от принимаемого срока ее службы и класса по нагревостойкости, так называемая максимальная номинальная рабочая температура. Получаемые при максимальной номинальной рабочей температуре мощность и ток принимаются за номинальные. Вследствие этого в установившемся режиме работы с постоянным значением максимальной номинальной рабочей температуры  $\nu_{oc} + \Delta\nu_n^{max}$  все тепло изолированного проводника, образующееся в нем потерями мощности  $\Delta P_n$  при номинальном значении нагрузки  $P_n$ , рассеивается в окружающую среду и соблюдается простейший баланс [5]

$$\Delta P_n = R \cdot \Delta\nu_n^{max}, \quad (2)$$

где  $R$  – коэффициент теплоотдачи с поверхности изоляции, Вт/°С;  $\nu_n^{max}$  – предельно допустимое превышение температуры обмотки над температурой окружающей среды  $\nu_{oc}$ , °С.

Исходя из условия (2) определяется численное значение коэффициента теплоотдачи

$$R = \frac{\Delta P_n}{\Delta\nu_n^{max}}. \quad (3)$$

Ввиду постоянства коэффициента теплоотдачи появляется возможность определять текущее значение температуры перегрева изоляции при любом установившемся значении потерь мощности  $\Delta P$ :

$$\Delta\nu_n = \frac{\Delta P}{R} = \frac{\Delta P \cdot \Delta\nu_n^{max}}{\Delta P_n}. \quad (4)$$

В свою очередь, потери мощности имеют две составляющие – постоянную (холостого хода)  $\Delta P_{xx}$  и переменную (нагрузочную), поэтому

$$\Delta P = \Delta P_{xx} + \Delta P_{nn} \cdot k_{nn}^2 = \Delta P_{xx} + \Delta P_{nn} \cdot \frac{P^2}{P_n^2}, \quad (5)$$

где  $\Delta P_{nn}$  – нагрузочные потери при номинальной мощности;  $k_{nn}$  – коэффициент нагрузки. Тогда температура нагрева обмотки и изоляции в формуле (1) при любом значении нагрузки будет определяться тремя составляющими:

$$\nu_{oc} + \Delta\nu_n^{max} = \nu_{oc} + \frac{\Delta P_{xx}}{R} + \frac{\Delta P_{nn}}{R} \cdot \frac{P^2}{P_n^2}, \quad (6)$$

т. е. суммой температур окружающей среды, перегрева при работе в длительном режиме холостого хода, перегрева от нагрузочных потерь, пропорциональных квадрату коэффициента нагрузки  $k_{nn} = P/P_n$ .

В итоге формула (1) при подстановке в нее (6) принимает вид

$$T = 1,5 \cdot 10^4 \exp \left[ -0,088 \cdot \left( \nu_{oc} + \frac{\Delta\nu_n^{max}}{\Delta P_n} \cdot \Delta P_{xx} + \frac{\Delta\nu_n^{max}}{\Delta P_n} \cdot \Delta P_{nn} \cdot \frac{P^2}{P_n^2} \right) \right]. \quad (7)$$

Такой вид зависимости срока службы изоляции в годах от текущей нагрузки дает возможность сформулировать задачи управления режимом нагрузки в целях определения максимального срока службы изоляции у параллельно работающих трансформаторов.

Примем, что  $m$  трансформаторов параллельно работают на общую полную мощность  $S_c$ , которая изменяется через каждый  $j$ -й одинаковый интервал времени  $\Delta t$  по графику  $S_c = \{S_{c1}, \dots, S_{cj}, \dots, S_{cn}\}$ , в течение которого выполняется условие баланса мощностей

$$S_{cj} = \sum_{i=1}^m S_{ij}. \quad (8)$$

За рассматриваемое время  $n \cdot \Delta t$  на выходе трансформаторов получается полная энергия

$$W_c = \Delta t \sum_{j=1}^n S_{cj} = \Delta t \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n S_{ij}. \quad (9)$$

У каждого трансформатора срок службы изоляции изменяется от текущего значения нагрузки  $S_{ij}$  в каждый  $j$ -й интервал времени по формуле (7). Требуется найти  $n \cdot m$  значений нагрузок трансформаторов  $S_{ij}$ , которые дают максимум суммы сроков службы их изоляции при заданном условии (9) количества энергии

$$T_c = \max \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T_{из i}(S_{ij}). \quad (10)$$

Решение этой задачи можно получить методом неопределенных множителей Лагранжа [6], сводящим условия задачи (7), (8), (9) к системе нелинейных уравнений, каждое из которых является первой производной целевой функции (10) по всем переменным  $S_{ij}$ , т. е.

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_1(S_{11})}{\partial S_1} &= \dots = \frac{\partial T_i(S_{i1})}{\partial S_i} = \dots = \frac{\partial T_m(S_{m1})}{\partial S_m} = \\ \dots & \\ &= \frac{\partial T_1(S_{1j})}{\partial S_1} = \dots = \frac{\partial T_i(S_{ij})}{\partial S_i} = \dots = \frac{\partial T_m(S_{mj})}{\partial S_m} = \\ \dots & \\ &= \frac{\partial T_1(S_{1n})}{\partial S_1} = \dots = \frac{\partial T_i(S_{in})}{\partial S_i} = \dots = \frac{\partial T_m(S_{mn})}{\partial S_m}. \end{aligned} \quad (11)$$

Вследствие равенств по условию (11) и одинаковости производных функций (10)  $T_i = F(S_{ij})$  у одного и того же  $i$ -го агрегата вытекает, что

$$S_{i1} = \dots = S_{ij} = \dots = S_{in} = S_i, \quad (12)$$

т. е. у каждого агрегата в любой интервал времени мощность неизменна, или, иными словами, стабилизирована на время  $T = n \cdot \Delta t$ .

Вследствие этого система уравнений (11) упрощается до

$$\frac{\partial T_1(S_1)}{\partial S_1} = \dots = \frac{\partial T_i(S_i)}{\partial S_i} = \dots = \frac{\partial T_m(S_m)}{\partial S_m}, \quad (13)$$

а условие (8) до

$$S_{cj} = \frac{W_c}{\Delta t \cdot n} = S_{c \text{ ср}} = \text{const}. \quad (14)$$

В итоге можно заключить, что для максимального увеличения суммарного срока службы изоляции при заданной величине трансформируемой энергии в заданный промежуток времени  $T = n \cdot \Delta t$  у параллельно работающих трансформаторов требуется стабилизация общей мощности (14) и каждого агрегата при распределении общей мощности системы между агрегатами по условию (13).

Отсюда получают частные задачи.

1. Когда стабилизация общей нагрузки у потребителей невозможна, тогда в каждый  $j$ -й интервал времени общая нагрузка  $S_{cj}$  распределяется между  $m$  трансформаторами по условиям

$$S_{1j} + \dots + S_{ij} + \dots + S_{mj} = S_{cj}; \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_1(S_{1j})}{\partial S_1} &= \dots = \frac{\partial T_i(S_{ij})}{\partial S_i} = \dots = \\ &= \frac{\partial T_m(S_{mj})}{\partial S_m}. \end{aligned} \quad (16)$$

2. При одном трансформаторе, работающем на заданную нагрузку, максимальный срок службы его изоляции достигается, когда нагрузка стабилизирована во времени.
3. При параллельной работе трансформаторов с одинаковыми количественными характеристиками (класс изоляции по нагревостойкости, мощности, потерям холостого хода и короткого замыкания) суммарный максимальный срок службы их изоляции достигается при равенстве нагрузок трансформаторов и их стабилизации во времени.

## Выводы

1. В условиях, когда значительная часть трансформаторного парка приблизилась к исчерпанию или исчерпала срок службы (назначенный ресурс) изоляции, основной задачей дальнейшей эксплуатации становится максимальное продление срока ее службы.
2. Температура перегрева изоляции обмоток трансформаторов и соответствующий ей срок службы зависят от квадрата коэффициента нагрузки.
3. Максимум суммарного срока службы изоляции параллельно работающих силовых трансформаторов достигается при стабилизации их общей нагрузки и ее распределении между ними пропорционально первым производным их зависимостей срока службы изоляции от их нагрузки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *ГОСТ 11677-85* Трансформаторы силовые. Общие технические условия.
2. *ГОСТ 27905.1-2009 (МЭК 505-75)* Системы электрической изоляции электрооборудования.
3. *Костенко М. П., Пиотровский Л. М.* Электрические машины. Часть 2. ГЭИ. М.; Л., 1958. 651 с.
4. *Львов М. Ю.* Анализ повреждаемости силовых трансформаторов напряжением 110 кВ и выше // *Электричество*. 2010. № 2. С. 27–31.
5. *Проектирование электрических машин*. Учебник для вузов / Под ред. И. П. Копылова. М.: Высшая школа, 2002. 757 с.
6. *Физтенгольц Г. М.* Основы математического анализа. Т. 1. СПб.: Лань, 1999. 448 с.

Поступила в редакцию 02.04.2015

## REFERENCES

1. *GOST* 11677-85 Transformatory silovye. Obshhie tehnicheckie uslovija [GOST 11677-85 Power transformers. General specification].
2. *GOST* 27905.1-2009 (MJeK 505-75) Sistemy jelektricheskoi izoljicii jelektroroborudovanija [GOST 27905.1-2009 (MEK 505-75) Electrical insulation systems of electrical equipment].
3. *Kostenko M. P., Piotrovskij L. M.* Jelektricheskie mashiny. Chast' 2 [Electrical machines. Part 2]. Moscow; Leningrad: GJel, 1958. 651 p.
4. *L'vov M. Ju.* Analiz povrezhdaemosti silovykh transformatorov naprjazheniem 110 kV i vyshe

[An analysis of the damage susceptibility of 110 kV and higher power transformers]. *Jelektrichestvo* [Electricity]. 2010. N 2. P. 27–31.

5. *Proektirovanie* jelektricheskikh mashin. Uchebnik dlja vuzov [Design of electric machines: university textbook]. Ed. I. P. Kopylov. Moscow: Vysshaja shkola, 2002. 757 p.

6. *Fihtengol'c G. M.* Osnovy matematicheskogo analiza [The fundamentals of mathematical analysis]. SPb: Lan', 1999. Vol. 1. 448 p.

Received April 02, 2015

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Борисов Георгий Александрович**  
старший научный сотрудник, к. т. н.  
Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра РАН  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск,  
Республика Карелия, Россия, 185910  
эл. почта: borisov@krc.karelia.ru  
тел.: (8142) 766312

**Тихомирова Тамара Петровна**  
ученый секретарь, к. т. н.  
Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра РАН  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск,  
Республика Карелия, Россия, 185910  
эл. почта: tihomiro@krc.karelia.ru  
тел.: (8142) 785520

## CONTRIBUTORS:

**Borisov, George**  
Institute of Applied Mathematical Research,  
Karelian Research Centre, Russian Academy of Science  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk,  
Karelia, Russia  
e-mail: borisov@krc.karelia.ru  
tel.: (8142) 766312

**Tikhomirova, Tamara**  
Institute of Applied Mathematical Research,  
Karelian Research Centre, Russian Academy of Science  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk,  
Karelia, Russia  
e-mail: tihomiro@krc.karelia.ru  
tel.: (8142) 785520