

УДК 621.314

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМЫХ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПЕРЕГРУЗОК РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Докт. техн. наук, проф. АНИЩЕНКО В. А., асп. ИВАНОВ В. В.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: Ivanov_VV@minskenergo.by

Мощность силовых распределительных масляных трансформаторов выбирается исходя из экономической целесообразности режима их работы и надежности электроснабжения приемников электроэнергии при условии, что нагрузка трансформаторов не должна приводить к сокращению их нормального срока службы. Чрезмерно большие и длительные перегрузки существенно снижают надежность и соответственно срок службы трансформаторов из-за повышенного износа изоляции обмоток в результате перегрева. Неучет предыстории нагрузки и возможных изменений возникшей перегрузки в процессе ее дальнейшего развития может привести к большим погрешностям определяемой допустимой длительности перегрузки и как следствие к недопустимому перегреву изоляции обмоток или неполному использованию потенциальной перегрузочной способности трансформаторов, что ограничит возможность полного удовлетворения запросов потребителей электроэнергии. Именно поэтому действующий ГОСТ 14209–97 настоятельно рекомендует потребителям делать свои собственные расчеты допустимых нагрузок на основе реальных графиков нагрузки.

Разработана методика определения допустимой продолжительности систематической неаварийной перегрузки распределительного масляного трансформатора, учитывающая изменения кратности перегрузки на интервале времени ее существования и соответственно изменения теплового состояния трансформатора. Применение этой методики позволит повысить точность определения допустимой продолжительности систематических неаварийных перегрузок и, в конечном итоге, надежность работы трансформатора и системы электроснабжения в целом. Реализация методики предполагается посредством мониторинга нагрузки трансформатора как одной из задач автоматизированной системы контроля и учета электроэнергии.

Ключевые слова: масляный трансформатор, продолжительность перегрузки, потребитель электроэнергии, график электропотребления.

Ил. 5. Табл. 5. Библиогр.: 11 назв.

ASCERTAINMENT OF ADMISSIBLE SYSTEMATIC OVERLOADS IN THE DISTRIBUTIVE OIL-TRANSFORMERS

ANISHCHENKO V. A., IVANOV V. V.

Belarusian National Technical University

The capacity of power-distributive oil-transformers is selected on the basis of their operational mode cost-effectiveness and power-supply reliability of the electrical recipients on condition that the transformers duty should not lead to reduction of their normal life-in-service.

Unconscionable and protracted overloads intrinsically decrease reliability and respectively service life of the transformers owing to increased wear of the winding insulation because of the excessive heat.

The unaccounted previous loading history and possible changes of the risen overload in the course of its further development can lead to poor accuracy in the admissible overload-time estimation. Therefore, that may lead to intolerable excessive heat in the winding insulation or underutilization of the potential overload capacity of the transformers. Which limits the potentiality of complete demand satisfaction of the electrical consumers. This is exactly why the acting GOST 14209–97 strongly recommends the consumers to make their own calculations of the load-carrying capacity based on the real load curves.

The authors present a method for ascertainment of the admissible duration of the systematic non-emergency overload of a distributive oil-transformer. The ascertainment method accounts for the overload repetition-factor alteration on the time-interval of its occurrence and respectively the variation in the transformer thermal state. The employment of this method will allow improving accuracy in ascertainment of the admissible duration of the systematic non-emergency overloads and eventually the reliability of the transformer operation and the power-supply system in its entirety. The method realization is intended by means of the transformer-load monitoring as one of the tasks of the electric-energy automated control and accounting system.

Keywords: oil-immersed transformer, overload duration, electric consumer, load curve.

Fig. 5. Tab. 5. Ref.: 11 titles.

Введение. Мощность силовых распределительных масляных трансформаторов выбирается исходя из экономической целесообразности режима их работы и надежности электроснабжения приемников электроэнергии при условии, что нагрузка трансформаторов не должна приводить к сокращению их нормального срока службы. Чрезмерно большие и длительные перегрузки существенно снижают надежность и соответственно срок службы трансформаторов из-за повышенного износа изоляции обмоток в результате перегрева. В то же время недоиспользование потенциальной перегрузочной способности трансформаторов может привести к необоснованному преждевременному отключению потребителей электроэнергии и как следствие экономическому ущербу.

При проектировании рекомендуется выбирать трансформаторы с таким расчетом, что их можно будет перегружать на 40 % в течение пяти суток с продолжительностью перегрузки в каждые сутки не более 6 ч. Эта норма носит осредненный характер и не учитывает разные типы трансформаторов, системы их охлаждения и климатические условия. В процессе эксплуатации при росте с течением времени нагрузок потребителей электрической энергии и достаточно высоких температурах охлаждающей среды возникает необходимость обоснованно перегружать трансформаторы с учетом конкретных условий работы.

Межгосударственный стандарт ГОСТ 14209–97 [1], представляющий собой полный аутентичный текст МЭК 354 (1991), устанавливает технически обоснованные режимы нагрузки трансформаторов с точки зрения допустимых температур их нагрева и термического износа. В частности, для распределительных трансформаторов мощностью до 2500 кВ·А включительно и напряжением 35 кВ и менее с естественной циркуляцией воздуха и масла (система охлаждения ONAN), соответствующих ГОСТ 3484.2–88 [2], стандарт [1] приводит графики и таблицы для определения допустимой продолжительности режимов систематических неаварийных нагрузок для заданной температуры охлаждающей среды.

Следует заметить, что в более ранних редакциях [1, 2] вместо понятия «систематические нагрузки» использовалось определение «систематические перегрузки», которое подчеркивало, что перегрузки по току на каком-то интервале времени внутри суточного цикла имеют место, но являются допустимыми, поскольку компенсируются за счет понижения температуры охлаждающей среды или тока нагрузки в течение остальной части цикла. При этом, как и при постоянной номинальной нагрузке, происходит естественное нормальное сокращение службы трансформаторов в связи с эквивалентностью термического износа изоляции в обоих случаях. Различие старых и новой редакций носит терминологический характер. Представляется более точным определение «систематические неаварийные перегрузки», которое используется в данной статье.

Нормальный продолжительный режим нагрузки. Изоляция обмоток трансформаторов подвергается термохимическому износу. Этот процесс является кумулятивным и приводит к недопустимому состоянию изоляции. Скорость износа изоляции удваивается при каждом возрастании температуры приблизительно на 6 °С. Она определяется температурой наиболее нагретой точки изоляции и соприкасающихся с ней металлических частей. Для трансформаторов, удовлетворяющих требованиям ГОСТ 11677–85 [3], допустимое значение температуры наиболее нагретой точки, гарантирующее нормальный износ трансформаторов, составляет $\theta_{\text{доп}} = 98$ °С, что соответствует работе трансформатора при температуре охлаждающей среды $\theta_{\text{ос}} = 20$ °С и превышению температуры наиболее нагретой точки $\theta_{\text{ннт}} = 78$ °С.

При достаточно равномерном графике нагрузки в течение суток или на более продолжительном интервале времени допустимая кратность нагрузки существенно зависит от температуры охлаждающей среды. Допустимая кратность нагрузки в этом нормальном продолжительном режиме представляет собой отношение допустимого тока трансформатора $I_{\text{доп}}$ к его номинальному значению $I_{\text{ном}}$ при температуре охлаждающей среды $\theta_{\text{ос}} = 20$ °С

$$K_{\text{доп}} = \frac{I_{\text{доп}}}{I_{\text{ном}}}. \quad (1)$$

Допустимое превышение температуры наиболее нагретой точки определяется как разность температуры наиболее нагретой точки обмотки изоляции $\theta_{\text{из}}$ и температуры охлаждающей среды

$$\tau_{\text{доп}} = \theta_{\text{из}} - \theta_{\text{ос}}. \quad (2)$$

Значения допустимых кратностей нагрузки в нормальном продолжительном режиме при равномерном графике и разных температурах приведены в табл. 1.

Таблица 1

| Температура охлаждающей среды $\theta_{\text{ос}}$, °С | -25 | -20 | -10 | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Допустимое превышение температуры $\tau_{\text{доп}}$, °С | 123 | 118 | 108 | 98 | 88 | 78 | 68 | 58 |
| Допустимая кратность нагрузки $K_{\text{доп}}$, о. е. | 1,37 | 1,33 | 1,25 | 1,17 | 1,09 | 1,00 | 0,91 | 0,81 |

Нормальные режимы систематических перегрузок. Согласно [1], нормальные режимы систематических перегрузок представляют собой

циклические неаварийные режимы с нормальным сокращением срока службы, эквивалентным его сокращению в процессе продолжительной работы с номинальной нагрузкой при температуре охлаждающей среды $\theta_{oc} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. При этом не должна превышать допустимая температура наиболее нагретой точки, но допускается превышение допустимых при нормальном продолжительном режиме кратностей нагрузки, приведенных в табл. 1. Интервалы времени, в течение которых трансформатор работает с повышенной скоростью относительного износа изоляции, компенсируются интервалами с пониженной скоростью износа.

Для распределительных трансформаторов с системой охлаждения ONAN стандартом [1] определены допустимые продолжительности систематических неаварийных перегрузок в зависимости от кратности начальной нагрузки K_1 , предшествующей моменту возникновения перегрузки, и кратности перегрузки K_2 при разных значениях температуры охлаждающей среды в диапазоне от -25 до $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Эти допустимые перегрузки получены с невысокой точностью из-за принятых при их определении допущений, основными из которых являются:

- температура охлаждающей среды полагается неизменной на протяжении всего суточного графика нагрузки;
- суточное изменение нагрузки представлено упрощенным двухступенчатым прямоугольным графиком.

В указанном стандарте рассматриваются и более сложные типы двухступенчатых графиков: с одним максимумом нагрузки, с двумя максимумами различной продолжительности, с последовательными максимумами. Они могут использоваться для выбора номинальной мощности трансформаторов на стадии проектирования систем электроснабжения. Однако при эксплуатации нагрузка может непрерывно изменяться в широких пределах, и ее фактический график будет существенно отличаться от стандартного, что снижает точность определяемой допустимой продолжительности перегрузки.

Оценка точности стандартных допустимых систематических перегрузок. Произведем примерную оценку точности определяемой стандартной допустимой продолжительности систематических перегрузок на примерах режимов, представленных на рис. 1 и в табл. 2, 3.

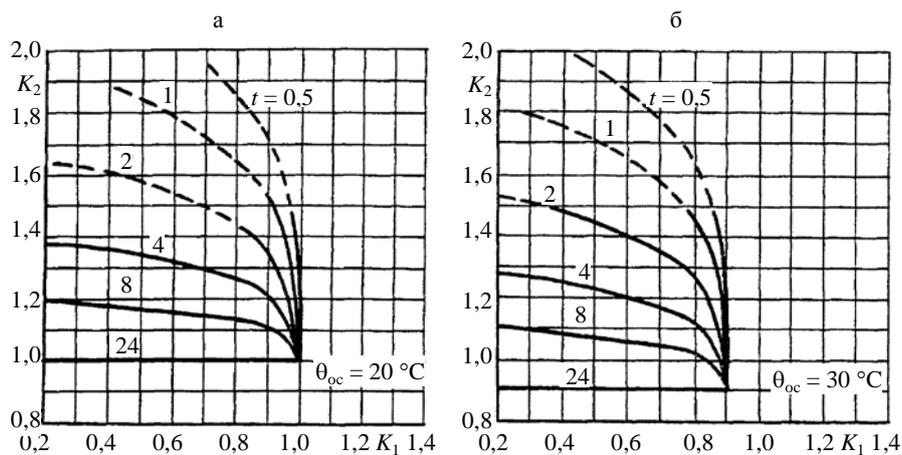


Рис. 1. Распределительные трансформаторы с охлаждением ONAN.
Допустимые режимы нагрузки с нормальным сокращением срока службы при:
а – $\theta_{oc} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; б – $30 \text{ }^\circ\text{C}$

Таблица 2

Режим нагрузки при $\theta_{oc} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

| $t, \text{ ч}$ | K_1 | | | | | |
|----------------|-------|------|------|------|------|------|
| | 0,25 | 0,50 | 0,70 | 0,80 | 0,90 | 1,00 |
| 0,5 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,00 |
| 1,0 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,00 |
| 2,0 | 1,50 | 1,50 | 1,49 | 1,43 | 1,34 | 1,00 |
| 4,0 | 1,37 | 1,34 | 1,29 | 1,25 | 1,19 | 1,00 |
| 8,0 | 1,18 | 1,17 | 1,15 | 1,13 | 1,10 | 1,00 |
| 24,0 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |

Таблица 3

Режим нагрузки при $\theta_{oc} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$

| $t, \text{ ч}$ | K_1 | | | | |
|----------------|-------|------|------|------|------|
| | 0,25 | 0,50 | 0,70 | 0,80 | 0,90 |
| 0,5 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,12 |
| 1,0 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,45 | 1,03 |
| 2,0 | 1,50 | 1,35 | 1,35 | 1,26 | 0,97 |
| 4,0 | 1,27 | 1,23 | 1,17 | 1,10 | 0,94 |
| 8,0 | 1,09 | 1,07 | 1,04 | 1,01 | 0,92 |
| 24,0 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,51 | 0,91 |

Предположим, что кратность начальной нагрузки $K_1 = 0,6$ и перегрузки $K_2 = 1,4$. При температуре охлаждающей среды $\theta_{oc} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ им соответствует допустимая продолжительность перегрузки $t_n = 3,6$ ч, а при резком повышении температуры сразу после наступившей перегрузки до $\theta_{oc} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ получаем $t_n = 2,0$ ч. При кратностях нагрузки и перегрузки $K_1 = 0,8$ и $K_2 = 1,4$ имеем $t_n = 2,8$ ч при $\theta_{oc} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t_n = 1,2$ ч при $\theta_{oc} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, неучет изменения температуры охлаждающей среды может значительно, до двух и более раз, изменить допустимую продолжительность перегрузки.

Не в меньшей степени на точность определения допустимой перегрузки может повлиять неучет фактического теплового состояния трансформаторов в момент времени t_1 , предшествующий началу перегрузки. Обратимся к эквивалентному суточному графику нагрузки (рис. 2), на основе которого стандарт [1] определяет допустимые значения t_n .

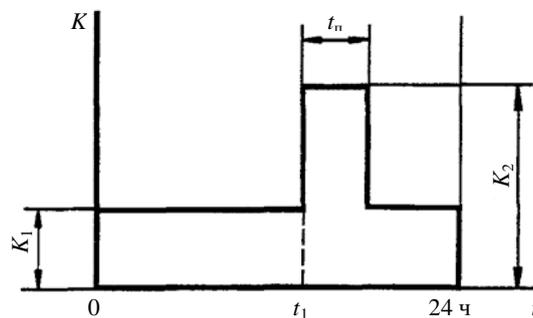


Рис. 2. Эквивалентный двухступенчатый график нагрузки

Кратность K_1 в этом случае полагается постоянной на всем интервале $(0, t_1)$, но в действительности она может существенно изменяться и ее зна-

чение в момент времени t_1 не будет соответствовать температуре наиболее нагретой точки. Одному и тому же значению K_2 могут соответствовать разные значения температуры из-за инерционности теплового процесса. Неучет предыстории нагрузки на интервале времени, предшествующем перегрузке, снижает точность определения t_n . Например, при кратности нагрузок $K_1 = 0,9$ и $K_2 = 1,3$ при $\theta_{oc} = 20$ °C имеем $t_n = 2,5$ ч. Если температура наиболее нагретой точки в момент времени t_1 соответствует $K_1 = 0,7$, то должно быть $t_n = 4,0$ ч.

Таким образом, неучет предыстории нагрузки и возможных изменений возникшей перегрузки в процессе ее дальнейшего развития может привести к большим погрешностям определяемой допустимой длительности перегрузки и, как следствие, к недопустимому перегреву изоляции обмоток или неполному использованию потенциальной перегрузочной способности трансформаторов, что ограничит возможность полного удовлетворения запросов потребителей электроэнергии. Именно поэтому стандарт [1] настоятельно рекомендует потребителям делать свои собственные расчеты допустимых нагрузок на основе реальных графиков нагрузки.

Математическая модель теплового режима трансформатора. Рассмотрим модель, описывающую изменения температуры трансформатора в неустановившемся режиме работы. С достаточной для практических целей точностью при расчетах норм нагрузочной способности трансформатора можно использовать классическое уравнение теплового баланса в «чистом виде» [4–6]

$$\Delta P dt = A dt - D d\tau, \quad (3)$$

где ΔP – мощность активных потерь при прохождении электрического тока, Вт; A – коэффициент теплоотдачи, Вт/°C; D – теплоемкость трансформатора, Вт·с/°C; τ – превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки изоляции $\theta_{из}$ над температурой охлаждающей среды θ_{oc} ,

$$\tau = \theta_{из} - \theta_{oc}, \quad (4)$$

$d\tau$ – прирост превышения температуры, °C; dt – шаг времени, с.

Из уравнения (3) можно определить установившееся значение превышения температуры наиболее нагретой точки над температурой окружающей среды

$$\tau_{уст} = \frac{\Delta P}{A} = \tau + T \frac{d\tau}{dt}, \quad (5)$$

где $T = D/A$ – постоянная времени нагрева трансформатора, с.

Поскольку постоянная времени нагрева обмотки невелика (5–10 с), постоянная времени нагрева трансформатора обусловлена в основном нагревом масла и для распределительных трансформаторов $T \approx 3$ ч.

Из (5) получаем зависимость превышения температуры наиболее нагретой точки в неустановившемся режиме от времени

$$\tau = \tau_{уст} - (\tau_{уст} - \tau_n) \exp\left(-\frac{t}{T}\right), \quad (6)$$

где τ_n – начальное превышение температуры наиболее нагретой точки.

Из (6) получаем формулу для расчета допустимой продолжительности систематической неаварийной перегрузки трансформатора, работающего с нормальным сокращением срока службы:

$$t_{\text{п}} = -T \ln \frac{\tau_{\text{уст}} - \tau_{\text{доп}}}{\tau_{\text{уст}} - \tau_{\text{н}}}, \quad (7)$$

где $\tau_{\text{доп}}$ – допустимое превышение температуры наиболее нагретой точки.

Переходной неустановившийся процесс нагрева показан на рис. 3.

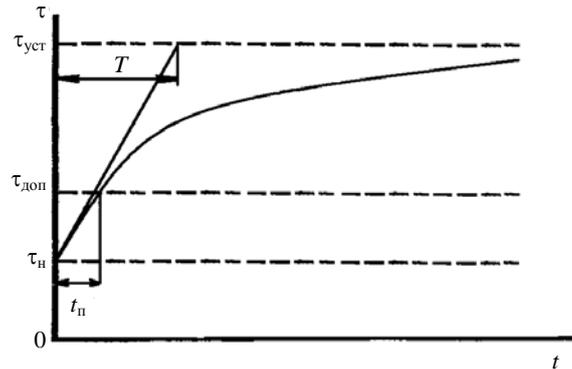


Рис. 3. Превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки трансформатора в зависимости от времени

Методика определения допустимой продолжительности систематической неаварийной перегрузки с учетом реального графика нагрузки. Согласно рекомендации стандарта [1], основным критерием допустимости перегрузки трансформатора является температура наиболее нагретой точки обмотки изоляции. Она ограничивается для распределительных трансформаторов значением $140\text{ }^{\circ}\text{C}$, которое соответствует началу ускоренного старения изоляции. Непосредственное измерение температуры наиболее нагретой точки затруднительно из-за высокого напряжения, и обычно ее вычисляют по методике, основанной на термохимическом законе Аррениуса и упрощенном соотношении Монтсингера [7]. Но даже если примириться со сложностью измерения температуры и отключать трансформатор на основе показания ее датчика, не получается прогнозировать допустимую продолжительность перегрузки из уравнения (7), так как неизвестно ожидаемое установившееся значение превышения температуры, соответствующее возникшей перегрузке.

Следует также учитывать зависимость постоянной времени нагрева от перегрузки, поскольку с ростом температуры увеличивается омическое сопротивление обмоток трансформатора. При небольших перегрузках порядка 10–25 % этим фактором можно пренебречь. Однако при больших перегрузках необходимо учитывать увеличение омического сопротивления, поскольку оно ведет к росту тепловой интенсивности электротермического процесса и уменьшает постоянную времени нагрева [4].

Поэтому не случайно действующий стандарт [1] регламентирует допустимую продолжительность перегрузки в зависимости не от температуры, а от первоначальной кратности нагрузки K_1 и перегрузки K_2 с учетом тем-

пературы охлаждающей среды (табл. 2, 3 и рис. 1). Связь между кратностью перегрузки и обусловленной ею кратностью превышения температуры изоляции обмоток над температурой охлаждающей среды отражает инерционное звено первого порядка с передаточной функцией

$$W(P) = \frac{k}{TP + 1}, \quad (8)$$

где входным сигналом является кратность перегрузки, выходным – кратность превышения температуры наиболее нагретой точки; $P = d/dt$ – оператор дифференцирования; k – коэффициент пропорциональности.

Если в процессе перегрузки ее кратность изменяется, то ее можно представить рядом накладывающихся ступенек кратности, сдвинутых относительно начала перегрузки на интервалы временной дискретизации процесса. Текущее превышение температуры в этом случае будет суммой переходных функций (6), сдвинутых на те же интервалы времени и умноженных на величины ступенек кратностей превышения температуры. При этом должны быть учтены начальные условия, различные в начале каждого интервала. В относительных единицах превышение температуры эквивалентно осредненной с постоянной времени T перегрузке, которая может непрерывно изменяться. Осреднение удобно производить методом экспоненциального сглаживания [8–11]

$$\overline{K}_1(t) = \alpha K_2(t) + [1 - \alpha] \overline{K}_1(t - h), \quad (9)$$

где $\overline{K}_1(t)$ – осредненная кратность нагрузки в момент времени t ; $\overline{K}_1(t - h)$ – осредненная кратность нагрузки в предыдущий момент времени $t - h$; h – интервал времени дискретизации процесса.

Параметр сглаживания α определяется при $T \gg h$ как

$$\alpha = 1 - \exp\left(-\frac{h}{T}\right). \quad (10)$$

Используя рекурсивное соотношение (9), можно непрерывно отслеживать осредненную кратность перегрузки и таким образом косвенно контролировать тепловое состояние трансформатора. Фактическая кратность перегрузки в текущий момент времени $K_2(t)$ эквивалентна соответствующему ей ожидаемому в момент времени $t + 3T$ установившемуся превышению температуры $\tau_{уст}$. Осредненная кратность перегрузки $\overline{K}_1(t)$ эквивалентна первоначальному превышению температуры τ_n в начале каждого интервала дискретизации [11].

Исходя из переходной функции (6), выводим идентичную (7) формулу для определения допустимой продолжительности систематической неварийной перегрузки

$$t_n = -T \ln \frac{K_2(t) - K_3}{K_2(t) - K_1(t)}, \quad (11)$$

где K_3 – кратность перегрузки, соответствующей допустимому превышению температуры наиболее нагретой точки.

Значение K_3 рассчитывается исходя из регламентируемых стандартом [1] допустимых значений кратностей K_1 и K_2 (индекс времени здесь опущен)

$$K_3 = K_2 - (K_2 - K_1)e^{-\frac{t_n}{T}}. \quad (12)$$

Результаты расчетов кратности K_3 по формуле (12) при разных температурах окружающей среды представлены в табл. 4, 5. Значения K_1 и K_2 взяты из табл. 2, 3.

Таблица 4

Кратность допустимой перегрузки K_3 при $\theta_{oc} = 20^\circ\text{C}$

| | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| K_1 , о. е. | 0,900 | 0,800 | 0,700 | 0,500 | 0,250 | 0,900 | 0,800 | 0,700 | 0,500 | 0,250 | 0,800 | 0,700 | 0,500 |
| K_2 , о. е. | 1,100 | 1,130 | 1,150 | 1,170 | 1,180 | 1,190 | 1,250 | 1,290 | 1,340 | 1,370 | 1,40 | 1,490 | 1,500 |
| K_3 , о. е. | 1,086 | 1,107 | 1,119 | 1,122 | 1,115 | 1,113 | 1,13 | 1,133 | 1,116 | 1,073 | 1,122 | 1,085 | 1,090 |

Таблица 5

Кратность допустимой перегрузки K_3 при $\theta_{oc} = 30^\circ\text{C}$

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| K_1 , о. е. | 0,900 | 0,900 | 0,900 | 0,800 | 0,800 | 0,900 | 0,700 | 0,500 | 0,250 | 0,700 | 0,500 | 0,800 | 0,250 | 0,700 | 0,800 | 0,700 |
| K_2 , о. е. | 0,940 | 0,920 | 0,970 | 1,000 | 1,100 | 1,030 | 1,040 | 1,070 | 1,090 | 1,170 | 1,230 | 1,260 | 1,270 | 1,350 | 1,450 | 1,500 |
| K_3 , о. е. | 0,929 | 0,915 | 0,981 | 0,886 | 0,91 | 0,984 | 1,016 | 1,03 | 1,032 | 1,045 | 1,056 | 1,024 | 0,999 | 1,017 | 0,984 | 0,926 |

Среднее значение кратности допустимой перегрузки составило $K_{3cp} = 1,1086$ при $\theta_{oc} = 20^\circ\text{C}$ и $K_{3cp} = 0,9843$ при $\theta_{oc} = 30^\circ\text{C}$. Осреднение значений кратности K_3 позволяет упростить алгоритм. Анализ показал практически удовлетворительную точность определения допустимой продолжительности перегрузки при подстановке в расчетную формулу (11) среднего значения кратности K_{3cp} .

Апробация методики определения допустимой продолжительности систематической неаварийной перегрузки с учетом реального графика нагрузки. Апробация предложенной выше методики нормирования допустимой переменной перегрузки была произведена посредством вычислительного эксперимента. Зависимости от времени фактической (неосредненной) кратности перегрузки $K_2(t)$ и рассчитанной по формуле (9) с учетом (10) осредненной кратности $\overline{K_1}(t)$ показаны на рис. 4. Были приняты: первоначальная кратность нагрузки $K_1(0) = 0,25$; кратность возникшей в этот же момент времени перегрузки $K_2(0) = 1,18$; температура охлаждающей среды $\theta_{oc} = 20^\circ\text{C}$; шаг временной дискретизации $h = 3$ мин. Последующие изменения перегрузки составили $K_2(2) = 1,50$ и $K_2(3) = 1,25$.

Изменения допустимой продолжительности перегрузки, приведенной на рис. 4, показаны на рис. 5.

Кривая 1 соответствует случаю, когда не учитываются последующие изменения возникшей в момент времени $t = 0$ перегрузки, т. е. $K_2(t) = \text{const}$, и теплового состояния трансформатора в процессе перегрузки, т. е. $\overline{K_1}(t) = \text{const}$.

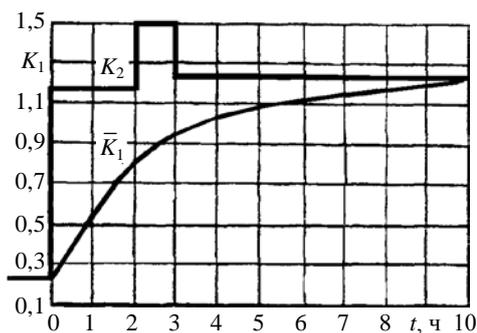


Рис. 4. Фактическая и осредненная перегрузки

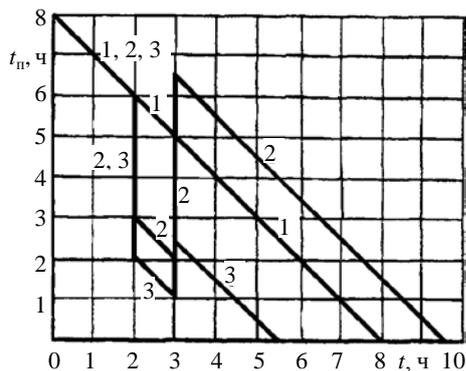


Рис. 5. Допустимая продолжительность перегрузки

Кривая 2 соответствует случаю, когда учитываются изменения перегрузки ($K_2(t) = \text{var}$), но не учитываются изменения теплового состояния трансформатора ($\bar{K}_1(t) = \text{const}$).

Кривая 3 соответствует случаю, когда учитываются изменения как фактической перегрузки ($K_2(t) = \text{var}$), так и характеризующей тепловое состояние трансформатора осредненной перегрузки ($\bar{K}_1(t) = \text{var}$).

Допустимую продолжительность перегрузки во всех трех рассмотренных случаях рассчитывали по формуле (11), справедливой как для нормируемых стандартом [1] неизменных в процессе наступившей перегрузки значений $K_2(t)$, так и для переменных значений $K_2(t)$, обусловленных изменением участка графика нагрузки, на котором происходит перегрузка.

Анализ результатов расчета значений t_n для $\theta_{oc} = 20^\circ\text{C}$, приведенных на рис. 5, как и для других значений температуры охлаждающей среды в диапазоне от -25°C до 40°C , показывает, что учет переменного характера возникшей перегрузки повышает точность определения ее допустимой продолжительности в несколько раз.

ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ показал, что неучет реального суточного графика нагрузки подстанции и переменного характера перегрузки силового распределительного трансформатора может привести к большим ошибкам в определении допустимой продолжительности перегрузки, что снизит надежность и срок службы или приведет к недоотпуску электроэнергии потребителям из-за необоснованного преждевременного отключения части электроприемников.

2. Разработана методика определения допустимой продолжительности систематической неаварийной перегрузки распределительного масляного трансформатора, учитывающая изменения кратности перегрузки на интервале времени ее существования и соответственно изменения теплового состояния трансформатора. Применение этой методики позволит повысить точность определения допустимой продолжительности систематических неаварийных перегрузок и, в конечном итоге, надежность работы трансформатора и системы электроснабжения в целом. Реализация методики предполагается посредством мониторинга нагрузки трансформатора как одной из задач автоматизированной системы контроля и учета электроэнергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки: ГОСТ 14209–85. – Взамен ГОСТ 14209–69; введ. 01.07.85. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 30 с.
2. Трансформаторы силовые. Методы испытаний и измерений: сборник. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 180 с.
3. Трансформаторы силовые. Общие технические условия: ГОСТ 11677–85. – Взамен ГОСТ 11677–75; введ. 01.07.1986. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 58 с.
4. Шницер, Л. М. Основы теории и нагрузочная способность трансформаторов / Л. М. Шницер. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 232 с.
5. Боднар, В. В. Нагрузочная способность силовых масляных трансформаторов / В. В. Боднар. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 177 с.
6. Чунихин, А. А. Электрические аппараты / А. А. Чунихин. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.
7. Киш, З. Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов / З. Л. Киш. – М.: Энергия, 1980. – 208 с.
8. Анищенко, В. А. Контроль допустимых кратковременных аварийных перегрузок силовых трансформаторов / В. А. Анищенко, В. А. Адамцевич // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2010. – № 3 – С. 23–33.
9. Анищенко, В. А. Допустимые переменные систематические перегрузки силовых трансформаторов / В. А. Анищенко, В. В. Иванов // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Десятой Междунар. науч.-техн. конф.: в 4 т. – Минск: БНТУ, 2012. – Т. 1. – С. 4–6.
10. Анищенко, В. А. Определение допустимых систематических нормальных нагрузок масляных трансформаторов / В. А. Анищенко, В. В. Иванов // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Минск: БГАТУ, 2013. – С. 36–37.
11. Бендат, Дж. Измерение и анализ случайных процессов / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1974. – 404 с.

REFERENCES

1. State Standard 14209–85. Oil-Immersed General-Purpose Power Transformers. Permissible Loads. Moscow, Publisher Standards, 1985. 30 p. (in Russian).
2. Power Transformers. Testing and Measurement Methods. Collection. Moscow, Publisher Standards, 1989. 180 p. (in Russian).
3. State Standard 11677–85. Power Transformers. General Technical Conditions. Moscow, Publisher Standards, 1990. 58 p. (in Russian).
4. Shnitsler, L. M. (1959) *Theoretical Framework and Loading Capacity of the Transformers*. Moscow, Gosenergoizdat. 232 p. (in Russian).
5. Bodnar, V. V. (1983) *Loading Capacity of the Oil-Immersed Power Transformers*. Moscow, Energoatomizdat. 177 p. (in Russian).
6. Chunikhin, A. A. (1988) *Electric Apparatuses*. Moscow, Energoatomizdat. 720 p. (in Russian).
7. Kish, Z. L. (1980) *Heating and Cooling of the Transformers*. Moscow, Energia. 208 p. (in Russian).
8. Anishchenko, V. A., & Adamtsevich, V. A. (2010) Control of Admissible Short-Run Emergent Overloads in the Power Transformers. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG – Energetika* [Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Energetika], 3, 23–33 (in Russian).
9. Anishchenko, V. A., & Ivanov, V. V. (2012) Admissible Variable Systematic Overloads in the Power Transformers. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike. Materialy Desiatoi mezhdunarodnoi Nauch.-Tekhn. Konf. T. 1* [Science to Education, Industry, Economics. Proceedings of 10th International Science and Technical Conference. Vol. 1]. Minsk: BNTU, 4–6 (in Russian).
10. Anishchenko, V. A., & Ivanov, V. V. (2013) Ascertainment of Admissible Systematic Normal Loads of the Oil-Immersed Power Transformers. *Energoberezhnie – Vazhneishee Uslovie Innovatsionnogo Razvitiia APK: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf.* [Power Saving – the Controlling Factor of the Agroindustrial Complex Innovative Development: Proceedings of International Scientific and Technical Conference]. Minsk: BSATU [Belarusian State Agrarian Technical University], 36–37 (in Russian).
11. Bendat, J. S., & Piersol A. G. (1966) *Measurement and Analysis of Random Data*. John Wiley & Sons, Inc, New-York. (Russ. ed.: Bendat, J. & Piersol A. (1974) *Izmerenie i Analiz Sluchainykh Protseessov*. Moscow, Mir. 404 p.).

Представлена кафедрой электроснабжения

Поступила 04.12.2014