

УДК 621.319.4

DOI: 10.22213/2413-1172-2021-4-80-91

Анализ режимов работы масляных силовых трансформаторов напряжением 10(6)/0,4 кВ**А. Е. Фокеев**, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия**И. Н. Тумаков**, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Скорость термического старения изоляции обмоток силовых трансформаторов зависит от воздействия электрического поля, механических напряжений, температуры и процессов, обуславливающих изменение этих факторов. Рассмотрен алгоритм расчета, позволяющий определить температуру наиболее нагретой точки обмоток масляного силового трансформатора при известных значениях тока нагрузки и температуры окружающей среды.

Расчет температуры наиболее нагретой точки обмотки и скорости термического старения изоляции для масляного силового трансформатора при различной температуре окружающей среды в течение года, различных значениях и различном спектральном составе тока электрической нагрузки показал, что в некоторых случаях возможно нарушение допустимых условий эксплуатации силовых трансформаторов. По результатам расчета построены зависимости скорости термического старения изоляции от температуры окружающей среды, при различных параметрах нагрузки и различных коэффициентах загрузки силовых трансформаторов. Для рассмотренных режимов в теплое время года значение скорости термического старения изоляции значительно превышает номинальное значение.

На основе математических моделей масляных силовых трансформаторов с естественной и принудительной циркуляцией масла получены выражения для определения коэффициента снижения допустимой нагрузки масляных силовых трансформаторов при превышении значения температуры окружающей среды нормального значения 20 °С. На основе этих выражений для практического использования построены зависимости коэффициента снижения допустимой нагрузки от температуры окружающей среды.

Влияние температуры окружающей среды необходимо учитывать при выборе мощности масляных силовых трансформаторов, для которых предполагается работа в режиме полного резервирования или высокими значениями коэффициента загрузки ($\geq 0,8$) в нормальном режиме. Для обеспечения нормативного срока службы изоляции обмоток необходимо осуществлять определение расчетной мощности масляных силовых трансформаторов с использованием коэффициента снижения допустимой нагрузки под воздействием высших гармоник тока и коэффициента снижения допустимой нагрузки под воздействием температуры окружающей среды.

Ключевые слова: масляные силовые трансформаторы, скорость термического старения изоляции обмоток, снижение номинального срока службы, высшие гармоники тока, температура окружающей среды.

Введение

Несмотря на развитие технологий производства изоляционных материалов и совершенствование конструкции безопасных и экологичных сухих силовых трансформаторов, масляные силовые трансформаторы напряжением 10(6)/0,4 кВ продолжают изготавливаться и успешно эксплуатироваться на территории России в электроэнергетике, промышленности и коммунальном хозяйстве [1].

Реальный срок службы силового трансформатора в значительной степени зависит от воздействия таких явлений, как перенапряжения,

короткие замыкания в электрической сети и аварийные перегрузки. Вероятность безотказной работы силовых трансформаторов зависит как от значений параметров, характеризующих эти воздействия (амплитуда, длительность), так от конструктивных особенностей силовых трансформаторов. Важную роль играет фактическое состояние силового трансформатора и изоляции его активных частей. Другими словами, нарушение нормальных условий эксплуатации приводит к ухудшению общего состояния силового трансформатора и увеличивает вероятность преждевременного отказа.

Дополнительным фактором, оказывающим негативное влияние на условия эксплуатации силовых трансформаторов, являются высшие гармоники тока [2], под воздействием которых происходит дополнительный нагрев обмоток [3] и увеличивается скорость термического старения изоляции. Необходимо отметить, что интенсивность указанных воздействий увеличивается в сетях с альтернативными источниками энергии [4].

Целью исследования является анализ режимов работы масляных силовых трансформаторов в условиях воздействия высших гармоник тока и различных значениях температуры окружающей среды для последующей разработки алгоритма выбора мощности масляных силовых трансформаторов.

Литературный обзор

В фундаментальных работах Л. М. Шницера (Основы теории и нагрузочная способность трансформаторов, 1959) и Л. В. Киша (Нагрев и охлаждение трансформаторов, 1980) рассмотрены вопросы оценки ресурса силовых масляных трансформаторов и учета износа изоляции при длительных перегрузках. В этих работах исследованы зависимости старения бумажной изоляции от времени и температуры, эксплуатационные физические воздействия, которым подвергается изоляция масляных силовых трансформаторов. Принято считать, что каждые 10°C повышения температуры ускоряют процесс старения в 2,4 раза, а каждые 8°C сокращают время износа вдвое («кривая жизни» твердой электрической изоляции).

В работе [5] приведены результаты оценки допустимых коэффициентов загрузки масляных силовых трансформаторов с системой охлаждения путем естественной циркуляции масла (ON) в нормальном режиме, при нормальной температуре окружающей среды и линейном характере электрической нагрузки. Полученные результаты вызывают сомнение, поскольку при номинальной нагрузке и нормальной температуре окружающей среды ($\Theta_a = 20^\circ\text{C}$) скорость термического старения изоляции значительно превышает номинальное значение, а относительное изменение срока службы составляет 93 %.

Результаты моделирования силового трансформатора в условиях воздействия высших гармоник тока электрической нагрузки [6] показали, что дополнительные потери мощности изменяются в пределах 2...10,5 %. Моделирование тепловых процессов в силовом трансформаторе подтверждает увеличение температуры

нагрева активных частей и изоляции при воздействии высших гармоник тока [7] и напряжения [8].

Предлагаются подходы к выбору мощности силовых трансформаторов [9, 10], в которых основным условием для выбора мощности является ограничение температуры наиболее нагретой точки обмоток при кратковременных систематических перегрузках. При этом не учитывается влияние высших гармоник тока и напряжения.

Математическая модель масляного силового трансформатора

Номинальный срок службы силового трансформатора – это условная величина, которая принимается для непрерывной постоянной нагрузки при нормальной температуре охлаждающей среды и номинальных условиях эксплуатации. При несоблюдении нормальных условий эксплуатации наблюдается ускоренный износ изоляции. Так, превышение номинального значения нагрузки силового трансформатора приводит к следующему:

- повышение температуры обмоток, соединений, изоляции и масла с возможным выходом за предельно допустимые значения;
- увеличение магнитного потока рассеяния, и, как следствие, повышение температуры нагрева металлических частей трансформатора вихревыми токами;
- снижение эксплуатационных возможностей магнитной системы при высоких значениях индукции, обусловленных влиянием основного и добавочного потоков рассеяния;
- изменение содержания влаги и газа в изоляции и масле при повышении температуры;
- ограничение возможности применения контактных и коммутационных устройств, которые подвергаются повышенным нагрузкам и повышенному нагреву.

Анализ режимов работы масляных силовых трансформаторов возможен с использованием математических моделей, которые описаны в ГОСТ Р 14209–97 «Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов». Далее представлен алгоритм расчета параметров с использованием этих моделей.

Температура наиболее нагретой точки обмотки масляного силового трансформатора с естественной циркуляцией масла определяется по выражению

$$\Theta_h = \Theta_a + \Delta\Theta_{or} \left[\frac{1 + RK_3^2}{1 + R} \right]^x + H_{gr} K_3^y, \quad (1)$$

где Θ_a – температура окружающей среды, °C; $\Delta\Theta_{or}$ – превышение температуры масла в верхних слоях, °C; R – отношение потерь короткого замыкания к потерям холостого хода при номинальной нагрузке; K_3 – коэффициент загрузки силового трансформатора; H_{gr} – градиент температуры наиболее нагретой точки, °C; x – показатель степени масла; y – показатель степени обмотки.

Температура наиболее нагретой точки обмотки масляного силового трансформатора с принудительной циркуляцией масла определяется по выражению

$$\Theta_h = \Theta_a + \Delta\Theta_{br} \left[\frac{1 + RK_3^2}{1 + R} \right]^x + 2[\Delta\Theta_{imr} - \Delta\Theta_{br}]K_3^y + H_{gr}K_3^y, \quad (2)$$

где $\Delta\Theta_{imr}$ – превышение средней температуры масла, °C; $\Delta\Theta_{br}$ – превышение температуры в нижней части обмотки, °C. Значения параметров Θ_a , $\Delta\Theta_{or}$, $\Delta\Theta_{imr}$, R , H_{gr} , x и y принимаются согласно математическим моделям масляного силового трансформатора с естественной циркуляцией масла (ON) и принудительной циркуляцией масла (OFF) по ГОСТ Р 14209–97 (табл. 1).

Таблица 1. Параметры математической модели силового трансформатора

Table 1. Power transformer mathematical model parameters

| Параметр | Θ_a , °C | $\Delta\Theta_{or}$, °C | $\Delta\Theta_{br}$, °C | $\Delta\Theta_{imr}$, °C | R | H_{gr} | x | y |
|---------------------------------------|-----------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|-----|----------|-----|-----|
| Естественная циркуляция масла (ON) | 20 | 52 | 34 | 43 | 6 | 26 | 0,9 | 1,6 |
| Принудительная циркуляция масла (OFF) | 20 | 56 | 36 | 46 | 6 | 22 | 1,0 | 1,6 |

Полученные значения температуры наиболее нагретой точки могут быть использованы для определения показателей, которые характеризуют скорость термического старения изоляции обмоток масляного силового трансформатора.

Скорость термического старения изоляции определяется по выражению

$$V = A \cdot 2^{\frac{\Theta_h - 98}{6}}, \quad (3)$$

где A – постоянная, значение которой зависит от первоначального состава целлюлозных продуктов и параметров окружающей среды.

Ввиду отсутствия количественного критерия оценки срока службы масляного силового трансформатора можно выполнить оценку влияния различных факторов посредством оценки изменения скорости термического старения изоляции. Целесообразно использовать показатель «относительная скорость термического старения изоляции», который в рассматриваемом контексте идентичен понятию «относительное изменение срока службы».

Относительная скорость термического старения изоляции (относительное изменение срока службы) определяется как отношение скорости износа изоляции при фактической температуре наиболее нагретой точки обмотки Θ_h к скорости износа изоляции при температуре окружающей среды $\Theta_a = 20$ °C и номинальной температуре наиболее нагретой точки $\Theta_{hr} = 98$ °C:

$$N = \frac{V_{\Theta_h}}{V_{98^\circ C}} = 2^{\frac{\Theta_h - 98}{6}}. \quad (4)$$

Важным аспектом является то, что номинальный срок службы масляного силового трансформатора и значения Θ_h , H_{gr} согласно ГОСТ Р 14209–97 рассматриваются при номинальном токе нагрузки и температуре окружающего воздуха $\Theta_a = 20$ °C. Именно при этих условиях производитель должен обеспечивать номинальное значение температуры наиболее нагретой точки обмотки $\Theta_{hr} = 98$ °C и номинальное значение скорости термического старения изоляции V для соответствующей системы охлаждения трансформатора.

Коэффициент загрузки силового трансформатора определяется как соотношение фактического значения полной мощности или тока нагрузки к номинальному значению полной мощности или тока силового трансформатора:

$$K_3 = \frac{S_{нагр}}{S_{тр.ном}} = \frac{I_{нагр}}{I_{тр.ном}}. \quad (5)$$

Для силовых трансформаторов, которые работают в условиях воздействия несинусоидальных токов, приведение значений нагрузки к допустимым значениям может выполняться с использованием нескольких методов, рассмотренных в [11]. Указанные методы предполагают снижение тока нагрузки до значения, обеспечивающего не превышение номинального уровня нагрузочных потерь $\Delta P_{нагр}$ в силовом трансформаторе и, как следствие, обеспечение значений температуры обмоток силового трансформатора в допустимых пределах. При соблюдении этого условия скорость термиче-

ского старения изоляции обмоток силового трансформатора не будет превышать номинального значения.

Используя положения стандарта UTE C-15-112–2000 Effects of current on human beings and livestock, возможно записать условия для определения коэффициента загрузки силового трансформатора при наличии высших гармоник тока (нелинейной нагрузке):

$$K_3 = \frac{I_{\text{нагр}}}{I_{\text{тр.ном}} \sqrt{1 + 0,1 \left(\sum_{h=2}^{40} h^{1,6} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \right)}} = \frac{I_{\text{нагр}}}{I_{\text{тр.ном}} K_{\text{СДНвг}}}, \quad (6)$$

где I_h – действующее значение гармонической составляющей тока нагрузки, А; h – порядок гармонической составляющей тока; I_1 – действующее значение первой гармонической составляющей тока нагрузки, А; $K_{\text{СДНвг}}$ – коэффициент снижения допустимой нагрузки силового трансформатора при воздействии высших гармоник тока.

Для упрощения процедуры расчета температуры наиболее нагретой точки по выражениям (1) и (2) при наличии высших гармонических составляющих тока возможно использовать значение коэффициента загрузки силового трансформатора, определяемое по выражению

$$K_3 = \frac{S_{\text{нагр}}}{S_{\text{тр.ном}} K_{\text{СДНвг}}}. \quad (7)$$

Условия расчета режимных параметров

Практика применения подходов к проектированию вентиляции электроустановок учитывает эксплуатационные особенности силовых трансформаторов [12, 13] и направлена на обеспечение значения температуры окружающей среды (в помещении ТП) не более $\Theta_a = 40$ °С при соответствующем для данной местности значении максимальной средней температуры наружного воздуха в теплое время года $T_{\text{ср.мах}}$ по таблице 4.1 из СП 131.13330.2012 «Строитель-

ная климатология». Для III и V климатических зон характерным является нагрев помещения избыточными тепловыми потоками оборудования на $\Delta\Theta_a = 15$ °С. Значения температуры окружающей среды Θ_a определялись для каждого месяца как сумма среднемесячной температуры наружного воздуха и температуры нагрева избыточными тепловыми потоками оборудования $\Delta\Theta_a = 15$ °С:

$$Q_a = T_{\text{ср.мес}} + \Delta Q_a. \quad (8)$$

В таблице 2 приведены значения температуры окружающей среды, рассчитанные по выражению (8) при известных значениях среднемесячной температуры наружного воздуха (по СП 131.13330.2012 для города Ижевска).

Электрическая нагрузка характеризуется следующими параметрами: коэффициенты h -й гармонической составляющей тока K_{Ih} (гармонический состав тока), доля полной мощности потребителей с нелинейной вольтамперной характеристикой $N_{\text{нн.нагр}}$ в составе полной мощности электрической нагрузки $S_{\text{нагр}}$:

$$N_{\text{нн.нагр}} = \frac{S_{\text{нн}}}{S_{\text{нагр}}}, \quad (9)$$

где $S_{\text{нн}}$ – полная мощность нелинейных потребителей, кВА, и доля полной мощности нелинейных потребителей $N_{\text{нн.тр}}$ в составе полной мощности трансформатора $S_{\text{тр.ном}}$:

$$N_{\text{нн.тр}} = \frac{S_{\text{нн}}}{S_{\text{тр}} n}, \quad (10)$$

где $S_{\text{тр.ном}}$ – номинальная мощность силового трансформатора, кВА; n – количество трансформаторов.

Параметры, определяемые по выражениям (9) и (10), имеют принципиальное различие, поскольку силовые трансформаторы практически никогда не работают в нормальном режиме со 100%-й загрузкой, даже в часы максимума. Кроме того, число силовых трансформаторов, как правило, равно двум, значит, полная мощность нелинейной нагрузки распределяется между двумя силовыми трансформаторами.

Таблица 2. Значения температуры окружающей среды в помещении ТП

Table 2. Values of ambient temperature in the TS room

| Параметр | Месяц | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------|---|----|----|----|------|----|----|----|------|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Значение Θ_a , °С | -1,5 | 3 | 10 | 19 | 27 | 31,5 | 34 | 31 | 25 | 17,5 | 10 | 5 |

Расчет вышеуказанных параметров силовых трансформаторов выполнялся для трех объектов, имеющих одинаковую полную мощность электрической нагрузки $S_{\text{нагр}}$, но отличных по гармоническому составу тока нагрузки: промышленный корпус, административное здание и

офисный центр. Исходные данные по рассматриваемым объектам приведены в таблице 3. Для удобства отображения результатов расчета и их интерпретации относительно гармонического состава тока нагрузки для каждого объекта введена нумерация спектра тока нагрузки (1, 2 и 3).

Таблица 3. Параметры электрической нагрузки объектов

Table 3. Object electrical loads parameters

| Параметр | Ед. измерения | Значение для объекта | | |
|------------------------------------|---------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| | | Производственный корпус (1) | Административное здание (2) | Торгово-офисный центр (3) |
| $S_{\text{нагр}}$ | кВА | 1750 | | |
| $N_{\text{нн.нагр}}$ | % | 50, 60, 70 и 80 | | |
| K_3 | — | 0,875 | | |
| $N_{\text{нн.тр}}$ | % | 44, 52, 61 и 70 | | |
| Гармонический состав тока нагрузки | K_{13} | 10 | 25 | 55 |
| | K_{15} | 55 | 12 | 35 |
| | K_{17} | 30 | 10 | 30 |
| | K_{19} | 2 | 9 | 15 |
| | K_{111} | 9 | 9 | 8 |
| | K_{113} | 7 | 6 | 5 |
| | K_{115} | 1 | 6 | 8 |
| | K_{117} | 4 | 5 | 5 |
| | K_{119} | 3 | 6 | 5 |
| | K_{123} | 2 | 8 | 8 |
| K_{125} | 2 | 9 | 8 | |

Гармонический состав тока нелинейной нагрузки производственного корпуса соответствует типовому гармоническому составу тока преобразователей частоты, имеющих входной трехфазный неуправляемый выпрямитель [14]. Гармонический состав тока административного здания и офисного центра отражает наличие однофазных импульсных источников питания в составе различных электронных устройств (персональные компьютеры, оргтехника, источники освещения и др.), имеющих мостовой и однополупериодный неуправляемый выпрямитель преимущественно без корректора коэффициента мощности [15].

Рассматривалась трансформаторная подстанция напряжением 10/0,4 кВ с двумя силовыми трансформаторами, встроенная или размещаемая в отдельном здании, имеющая систему естественной вентиляции посредством подачи уличного воздуха. Тип трансформаторов – масляные с естественной циркуляцией масла (ОН) и принудительной циркуляцией масла (ОФ).

В качестве исходных данных трансформатора использовались: значение номинального тока вторичной обмотки ($I_{\text{тр.ном}} = 1443$ А для трансформаторов мощностью 1000 кВА), значения параметров математических моделей по таблице 1.

Расчет параметров силовых трансформаторов производился для значений доли полной мощности нелинейной нагрузки $N_{\text{нн.нагр}} = 50, 60, 70$ и 80 % в составе полной мощности электрической нагрузки. При этом значения $N_{\text{нн.тр}}$ составляли 44, 52, 61 и 70 % соответственно. Принято допущение о равномерном распределении нагрузки между двумя трансформаторами.

Анализ результатов расчета

На рисунках 1 и 2 приведены графики изменения относительной скорости термического старения изоляции силовых масляных трансформаторов мощностью 1000 кВА с естественной (рис. 1) и принудительной (рис. 2) циркуляцией масла по месяцам в течение года – при значении коэффициента загрузки трансформаторов $K_3 = 0,875$, различных значениях доли нелинейной нагрузки $N_{\text{нн.нагр}}$ для рассматриваемых объектов с различным гармоническим составом тока электрической нагрузки.

Для графиков, которые приведены на рисунках 1 и 2, наибольшие значения скорости термического старения изоляции наблюдаются в летние месяцы. Повышение температуры наружного воздуха в теплое время года приводит к увеличению температуры окружающей среды в помещении трансформаторной подстанции до значений выше 20 °С. Для силовых трансфор-

маторов с синусоидальной формой тока нагрузки скорость термического старения не превышает номинального значения. Для силовых трансформаторов с несинусоидальной формой тока нагрузки (спектры тока 1, 2 и 3) максимальные значения скорости термического старения изоляции достигают 1,8...7 о.е.

Для линейной нагрузки относительная скорость термического старения изоляции не превышает номинального значения для всех рассматриваемых значений $\Theta_a = -1,5...+34$ °С, поскольку мощность силовых трансформаторов недоиспользована ($K_3 = 0,875$). Для режимов работы силовых трансформаторов на нелинейную

нагрузку при наиболее высокой среднемесячной температуре окружающей среды $\Theta_a = 34$ °С и изменении доли нелинейных потребителей в пределах $N_{нн.тр} = 44...70$ % относительная скорость термического старения изоляции составила:

– силовые масляные трансформаторы с естественной циркуляцией масла (ОН) – от 1,47 до 7,02 о.е., что соответствует диапазону значений суточного срока службы 35,28 и 168,48 ч/сут.

– силовые масляные трансформаторы с принудительной циркуляцией масла (ОП) – от 1,16 до 7,16 о.е., что соответствует диапазону значений суточного срока службы 27,84 и 171,84 ч/сут.

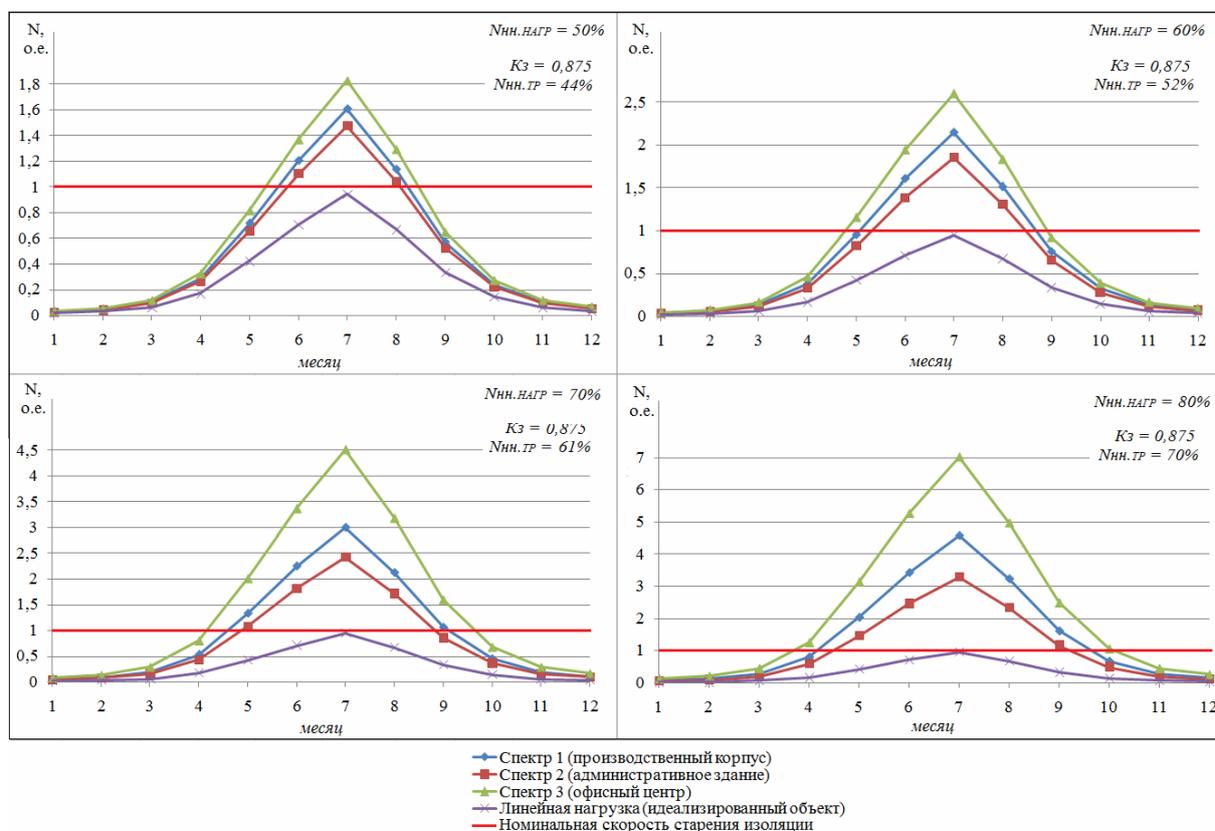


Рис. 1. Графики изменения скорости термического старения изоляции обмоток для силовых масляных трансформаторов с естественной циркуляцией масла (ОН) при $K_3 = 0,875$ по месяцам в течение года

Fig. 1. Graphs of changes in the aging thermal rate of windings insulation for oil power transformers with natural (ON) oil circulation at $K_3 = 0,875$ by month during the year

Графики на рисунках 1 и 2 свидетельствуют о значительном увеличении относительной скорости термического старения изоляции сверх номинального значения ($N = 1,0$) под влиянием температуры окружающей среды при несинусоидальном токе нагрузки: при $N_{нн.тр}$ от 44 до 52 % только в летние месяцы; при $N_{нн.тр}$ от 61 до 70 % с апреля по сентябрь.

Диаграмма выработки срока службы изоляции обмоток за год для силовых масляных

трансформаторов с естественной циркуляцией масла приведена на рисунке 3. Диаграмма построена при условии равномерной нагрузки в течение суток и в течение года.

Необходимо отметить, что коэффициент загрузки силовых трансформаторов ($K_3 = 0,875$) превышает значения коэффициента снижения допустимой нагрузки ($K_{сднвг} = 0,855...0,933$ – без учета режима $N_{нн.тр} = 44$ %) не для всех рассматриваемых режимов. Следовательно, со-

блюдение рекомендаций стандарта UTE C-15-112–2000 в части снижения допустимой нагрузки силовых трансформаторов не является единственным условием для обеспечения номинального срока службы. При значениях коэффициента загрузки, не превышающих

значений коэффициента допустимой нагрузки ($K_z, K_{CДНВГ}$), главным внешним фактором, определяющим скорость термического старения изоляции и срок службы силового трансформатора, становится температура окружающей среды.

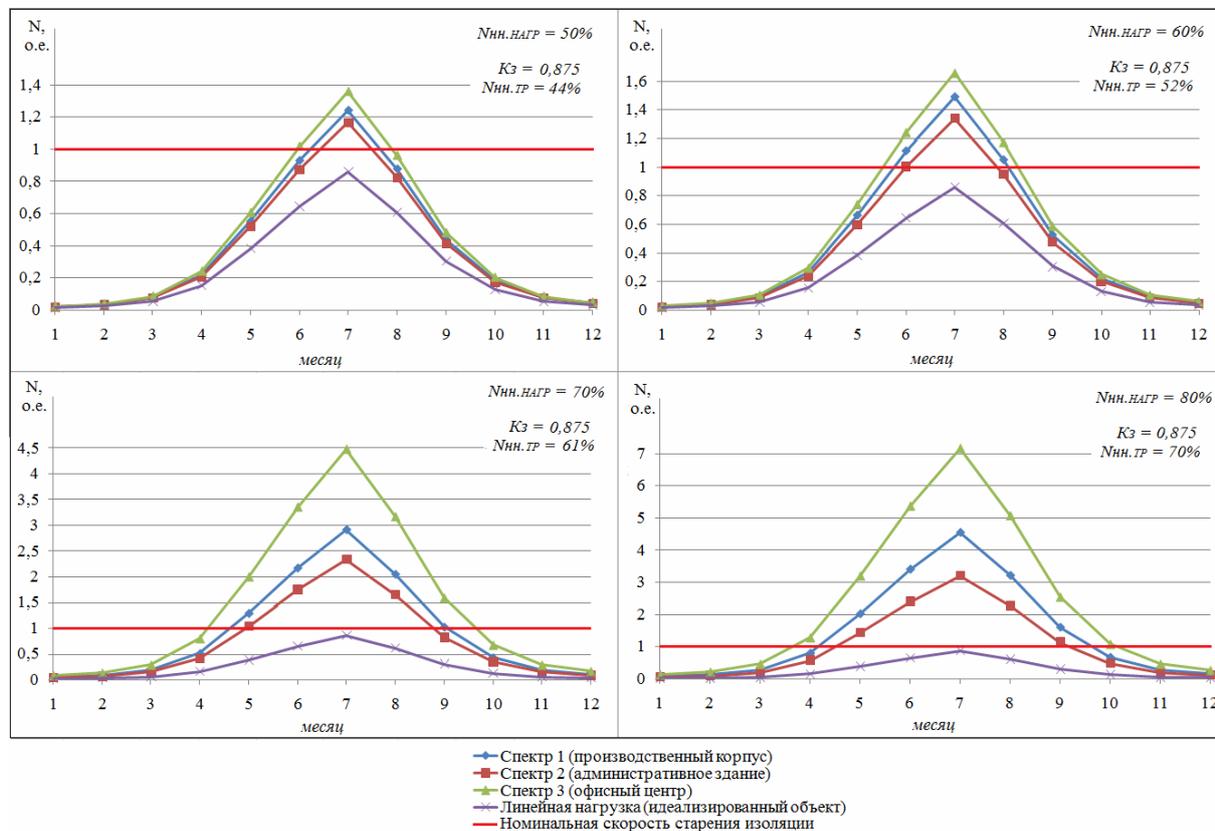


Рис. 2. Графики изменения скорости термического старения изоляции обмоток для силовых масляных трансформаторов с принудительной циркуляцией масла (OF) при $K_z = 0,875$ по месяцам в течение года

Fig. 2. Graphs of changes in the aging thermal rate of windings insulation for oil power transformers with forced (OF) oil circulation at $K_l = 0,875$ by month during the year

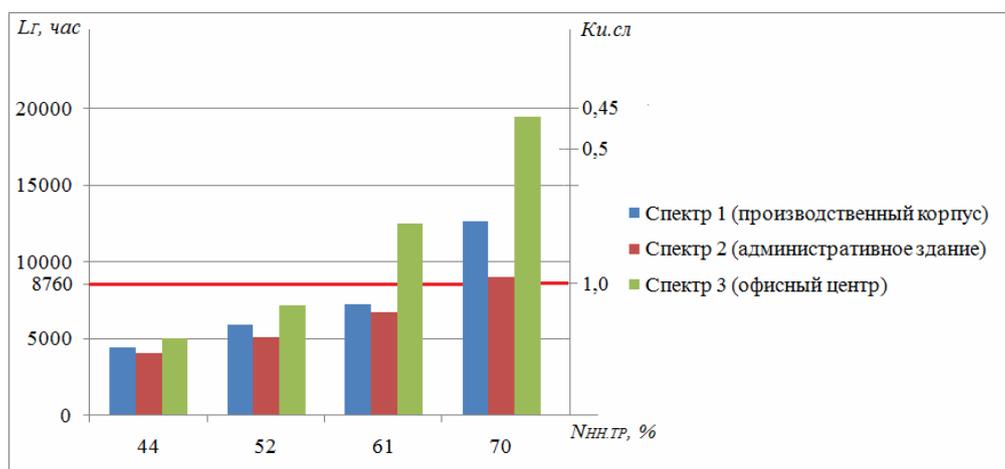


Рис. 3. Диаграмма выработки срока службы изоляции обмоток силовых масляных трансформаторов с естественной циркуляцией масла (ON) за год при различных режимах эксплуатации

Fig. 3. Diagram of the service life windings insulation of oil power transformers with natural (ON) oil circulation for a year under various operating conditions

Анализ полученных результатов свидетельствует о необходимости учитывать влияние температуры окружающей среды при выборе мощности силовых трансформаторов, для которых предполагается:

- работа при значительной доле полной мощности нелинейной нагрузки ($N_{нн.тр} \geq 50 \%$) и больших значениях коэффициента загрузки ($K_3 \geq 0,8$);
- полное резервирование в послеаварийном режиме ($K_3 = 0,5$);
- частичное резервирование в послеаварийном режиме ($K_3 = 0,6 \dots 0,7$).

Учет влияния температуры окружающей среды

В [16] приведены авторская методика и результаты анализа режимов работы силовых трансформаторов с использованием диаграмм нагрузочной способности. Указано, что для трансформаторов, устанавливаемых внутри помещений, где постоянная (или среднегодовая) температура окружающего воздуха Θ_a достигает $+15^\circ\text{C}$ и более, номинальная мощность должна быть перемаркирована по следующему принципу:

$$P'_{ном} = P_{ном} \left(1 + \frac{5 - Q_a}{100} \right), \quad (11)$$

где $P_{ном}$ – номинальная мощность силового трансформатора.

Применение выражения (11) возможно при условии использования полной электрической мощности S , однако с точки зрения единообразия маркировки и унификации подхода к выбору силовых трансформаторов и проектированию трансформаторных подстанций целесообразнее использовать коэффициент снижения допустимой нагрузки при увеличении температуры окружающей среды $K_{СДНт.о}$.

В случае превышения температуры окружающей среды значения 20°C возможно обеспечение $V = \text{const}$ путем снижения нагрузки силового трансформатора. Для масляных трансформаторов с естественной циркуляцией масла (ON), используя выражения (1) и (7), записав условие постоянства температуры наиболее нагретой точки обмотки как

$$\begin{aligned} & \Theta_a + \Delta\Theta_{or} \left[\frac{1 + RK_3^2}{1 + R} \right]^x + H_{gr} K_3^y = \\ & = (\Theta_a + \Delta\Theta_{a20}) + \Delta\Theta_{or} \left[\frac{1 + R(K_3 K_{СДНт.о})^2}{1 + R} \right]^x + \\ & + H_{gr} (K_3 K_{СДНт.о})^y \end{aligned} \quad (12)$$

для условий $\Theta_a = 20^\circ\text{C}$ и $K_3 = 1,0$, становится возможным выразить уравнение, описывающее взаимосвязь превышения температуры окружающей среды $\Delta\Theta_a$ и коэффициента необходимого снижения допустимой нагрузки силового масляного трансформатора с естественной циркуляцией масла (ON):

$$\begin{aligned} & 52 \left(\frac{1 + 6K_{СДНт.о}^2}{1 + 6} \right)^{0,9} + 26K_{СДНт.о}^{1,6} + \\ & + \Delta\Theta_{a20} - 78 = 0, \end{aligned} \quad (13)$$

где $\Delta\Theta_{a20}$ – значение превышения температуры окружающей среды $\Delta\Theta_{a20}$ над значением температуры $\Theta_a = 20^\circ\text{C}$.

Аналогично для математической модели силового масляного трансформатора с принудительной циркуляцией масла (OF), используя выражение (2), записав условие постоянства температуры наиболее нагретой точки обмотки как

$$\begin{aligned} & \Theta_a + \Delta\Theta_{br} \left[\frac{1 + RK_3^2}{1 + R} \right]^x + \\ & + 2[\Delta\Theta_{imr} - \Delta\Theta_{br}] K_3^y + H_{gr} K_3^y = \\ & = (\Theta_a + \Delta\Theta_{a20}) + \Delta\Theta_{br} \left[\frac{1 + R(K_3 K_{СДНт.о})^2}{1 + R} \right]^x + \\ & + 2[\Delta\Theta_{imr} - \Delta\Theta_{br}] (K_3 K_{СДНт.о})^y + \\ & + H_{gr} (K_3 K_{СДНт.о})^y \end{aligned} \quad (14)$$

для условий $\Theta_a = 20^\circ\text{C}$ и $K_3 = 1,0$, становится возможным выразить уравнение, описывающее взаимосвязь превышения температуры окружающей среды $\Delta\Theta_a$ и коэффициента необходимого снижения допустимой нагрузки силового масляного трансформатора с принудительной циркуляцией масла (OF):

$$\begin{aligned} & 30,857K_{СДНт.о}^2 + 42K_{СДНт.о}^{1,6} + \\ & + \Delta\Theta_{a20} - 72,857 = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Решения уравнений (13) и (15), полученные методом подбора значений $K_{СДНт.о}$ для различных значений $\Delta\Theta_{a20}$, приведены в виде зависимостей на рисунке 4. Кроме того, на рисунке 4 приведены зависимости, полученные Протацкой А. А., Вагаповым А. Р., Искандеровым Р. О. для сухих силовых трансформаторов с воздушно-барьерной изоляцией.

При изменении значений $\Delta\Theta_{a20}$ в пределах $1 \dots 20^\circ\text{C}$, что соответствует значению темпера-

туры окружающей среды Θ_a от 21 до 40 °С, для масляных силовых трансформаторов с естественной (ON) и принудительной (OF) циркуляцией масла диапазон изменения значений $K_{СДНт.о}$ составил 0,992...0,824. Согласно аналогичным расчетам для сухих трансформаторов с воздушно-барьерной изоляцией диапазон изменения значений $K_{СДНт.о}$ составил 0,996...0,897. Полученные результаты свидетельствуют о некотором преимуществе сухих силовых трансформаторов с воздушно-барьерной изоляцией, конструкция

которых предполагает лучшие условия для охлаждения обмоток. Для сухих силовых трансформаторов с литой изоляцией условия охлаждения обмоток значительно хуже, чем для масляных силовых трансформаторов с естественной циркуляцией масла (ON). Устойчивость к влиянию нагрузок и температуры окружающей среды силовых трансформаторов с монолитной изоляцией обмоток обеспечивается свойствами материалов, применяемых для изготовления изоляции, и требует дополнительного исследования.

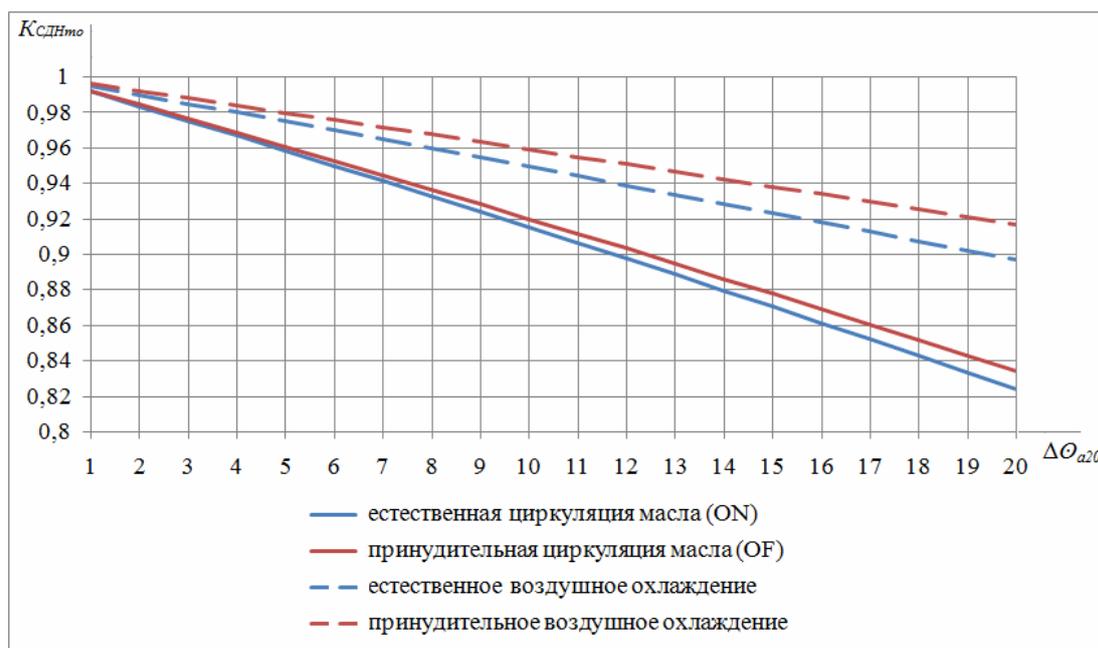


Рис. 4. Зависимости коэффициента снижения допустимой нагрузки силового трансформатора $K_{СДНт.о}$ от значения превышения температуры окружающей среды $\Delta\Theta_{a20}$ для масляных силовых трансформаторов при естественной (ON) и принудительной (OF) циркуляции масла

Fig. 4. Dependence of the coefficient of reduction of the permissible load of the power transformer K_{PLTa} on the value of excess of the ambient temperature $\Delta\Theta_{a20}$ for oil power transformers with natural (ON) and forced (OF) oil circulation

Для учета влияния температуры окружающей среды определение расчетной мощности силовых масляных трансформаторов в случае превышения температуры окружающей среды значения 20 °С необходимо выполнять по следующей формуле:

$$S_{тр.р} = \frac{S_p}{nK_3 K_{СДНвр} K_{СДНт.о}}, \quad (16)$$

где K_3 – расчетный коэффициент загрузки; n – число трансформаторов; S_p – расчетная мощность электрической нагрузки; $K_{СДНвр}$ – коэффициент снижения допустимой нагрузки при воздействии высших гармоник тока; $K_{СДНт.о}$ – коэффициент снижения допустимой нагрузки под влиянием температуры окружающей среды.

При использовании формулы (16) расчетная мощность силовых масляных трансформаторов с естественной циркуляцией масла (серии ТМ, ТМГ, ТМГФ) при известных параметрах электрической нагрузки (таблица 3), температуре воздуха в помещении трансформаторной $\Theta_{a20} = 30^\circ \text{C}$ и полной мощности нелинейной нагрузки $N_{нн.нагр} = 70\%$ составила, кВА,
– для производственного корпуса

$$S_{тр.р1} = \frac{1750}{2 \cdot 0,7 \cdot 0,94 \cdot 0,92} = 1445;$$

– для административного здания

$$S_{тр.р2} = \frac{1750}{2 \cdot 0,5 \cdot 0,95 \cdot 0,92} = 2002;$$

– для торгово-офисного центра:

$$S_{\text{тр.рз}} = \frac{1750}{2 \cdot 0,5 \cdot 0,928 \cdot 0,92} = 2006.$$

Таким образом, для всех рассматриваемых объектов номинальная мощность силовых трансформаторов должна быть увеличена на один типоразмер: 1600 кВА вместо 1250 кВА для производственного корпуса; 2000 кВА вместо 1600 кВА для административного здания и торгово-офисного центра.

Выводы

1. При значениях коэффициента загрузки, не превышающих значений коэффициента допустимой нагрузки ($K_z, K_{\text{СДНвг}}$), главным внешним фактором, определяющим скорость термического старения изоляции и срок службы силового трансформатора, становится температура окружающей среды.

2. Получены зависимости коэффициента снижения допустимой нагрузки силового трансформатора $K_{\text{СДНт.о}}$ от значения превышения температуры окружающей среды $\Delta\Theta_{a20}$ для масляных силовых трансформаторов.

3. Для обеспечения нормативного срока службы масляных силовых трансформаторов необходимо осуществлять определение расчетной мощности силовых трансформаторов с использованием коэффициента снижения допустимой нагрузки под воздействием высших гармоник тока $K_{\text{СДНвг}}$ и коэффициента снижения допустимой нагрузки при влиянии температуры окружающей среды $K_{\text{СДНт.о}}$.

4. Применение масляных силовых трансформаторов с принудительной циркуляцией масла (ОФ) не является решением проблемы влияния высших гармонических составляющих и температуры окружающей среды при значениях коэффициента загрузки $K_z \geq 0,8$ и доле полной мощности нелинейных потребителей $N_{\text{нн.тр}} = 44 \dots 70 \%$.

Библиографические ссылки

1. Протацкая А. А., Вагапов А. Р., Искандеров Р. О. Сравнение сухих и масляных трансформаторов // Наука среди нас. 2018. № 1 (5). С. 114–118.
2. Нго В. К., Коверникова Л. И. Прогнозирование влияния несинусоидального режима сети на силовые трансформаторы // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. № 4 (64). С. 36–43. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.4(64).36-43.
3. Singh J., Singh S. Amanpreet Singh. Effect of Harmonics on Distribution Transformer Losses and Ca-

capacity. International J. of Engineering Technology Science and Research, 2017, vol. 4, is. 6.

4. Моделирование работы силовых трансформаторов под нагрузкой и в режиме холостого хода / Д. С. Ярымбаш, М. И. Коцур, С. Т. Ярымбаш, И. М. Климерик // Проблемы региональной энергетики. 2020. № 1 (45). С. 1–13. eISSN: 1857-0070.

5. Галимова А. А. Критерии выбора коэффициента загрузки силового трансформатора при проектировании подстанций распределительных сетей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2013. № 5-6. С. 66–71.

6. Моделирование работы силового трансформатора при высоком уровне высших гармоник / Р. Г. Вильданов, А. Р. Вахитова, И. И. Габидуллин, Р. И. Кудояров // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2017. № 133. С. 24–29. eISSN: 1990-4665.

7. Abbas A., Zahab E. Abou El, Elbendary A. Thermal modeling and ageing of transformer under harmonic currents. Proc. of 23rd International Conference on Electricity Distribution. Lyon, 2015.

8. Thinh Dao, Abdull Halim H., Liu Z., Phung B.T. Voltage Harmonic Effect on Losses in Distribution Transformers. International Conference on Smart Green Technology in Electrical and Information Systems (ICSGTEIS). Bali (Indonesia), 2016.

9. Фурсанов М. И., Дуль И. И. Выбор номинальной мощности силовых трансформаторов // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 2015. № 2. С. 11–20.

10. Закалата А. А., Корчемкин С. А., Холманских В. М. Выбор мощности силовых трансформаторов цеховых подстанций 6-10/0,4 кВ для ремонтно-механических цехов и деревообрабатывающих промышленных предприятий с учетом типовых графиков нагрузок // Общество. Наука. Инновации (НПК-2017). Киров, 01–29 апреля 2017. С. 1052–1060.

11. Янченко С. А., Цырук С. А., Куликов А. И. Анализ методов разгрузки трансформаторов в сетях с высоким уровнем несинусоидальности тока // Промышленная энергетика. 2017. № 7. С. 44–53. ISSN: 0033-1155.

12. Киреева Э. А. Особенности эксплуатации силовых трансформаторов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2016. № 2. С. 16–21.

13. Киреева Э. А. Особенности эксплуатации силовых трансформаторов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2017. № 5-6. С. 76–81.

14. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 2-изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1984. 160 с.

15. Барсуков В. К., Гизатуллина О. Л., Новоселов М. Л. Анализ параметров работы низковольтной трехфазной электрической сети // Промышленная энергетика. 2018. № 9. С. 17–24.

16. Шницер Л. М. Основы теории и нагрузочная способность трансформаторов. Издание 5-е, перераб. М.: Государственное энергетическое издательство, 1959. 233 с.

References

1. Protatskaya A.A., Vagapov A.R., Iskandarov R.O. [Comparison of dry and oil transformers]. *Nauka sredi nas*, 2018, no. 1, pp. 114-118 (in Russ.).
2. Ngo V.C., Kovernikova L.I. [Prediction of the influence of the non sinusoidal network mode on power transformers]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie*, 2019, vol. 64, no. 4, pp. 36-43 (in Russ.). DOI: 10.26731/1813-9108.2019.4(64).36-43.
3. Singh J., Singh S. Amanpreet Singh. Effect of Harmonics on Distribution Transformer Losses and Capacity. *International J. of Engineering Technology Science and Research*, 2017, vol. 4, is. 6.
4. Yarymbash D.S., Kocur M.I., Yarymbash S.T., Klimnik I.M. [Electromagnetic processes simulation of power transformers in operation and in load modes]. *Problemy regional'noi energetiki*, 2020, no. 1, pp.1-13 (in Russ.). eISSN: 1857-0070.
5. Galimova A.A. [Kriterii vybora koeffitsienta zagruzki silovogo transformatora pri proektirovanii podstancij raspredelitel'nyh setej]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Problemy energetiki*, 2013, no. 5-6, pp. 66-71 (in Russ.). ISSN: 1998-9903.
6. Vil'danov R.G., Vahitova A.R., Gabidullin I.I., Kudoyarov R.I. [Modelirovanie raboty silovogo transformatora pri vysokom urovne vysshikh garmonik]. *Politematicheskij setevoj elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2017, no. 133, pp. 24-29 (in Russ.). eISSN: 1990-4665.
7. Abbas A., Zahab E., Abou E., Elbendary A. Thermal modeling and ageing of transformer under harmonic currents. *Proc. of 23rd International Conference on Electricity Distribution*. Lyon, 2015.
8. Thinh D., Abdull Halim H., Liu Z., Phung B. Voltage Harmonic Effect on Losses in Distribution Transformers. *International Conference on Smart Green Technology in Electrical and Information Systems (ICSGTEIS)*. Bali (Indonesia), 2016.
9. Fursanov M.I., Dul' I.I. [Selecting rated capacity for power transformers]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij i energeticheskikh ob'edinenij SNG. Energetika*, 2015, no. 2, pp. 11-20 (in Russ.). ISSN: 1029-7448 eISSN: 2414-0341.
10. Zakalata A.A., Korchemkin S.A., Holmanskikh V.M. [Vybor moshchnosti silovykh transformatorov cekhovyyh podstancij 6-10/0,4 kV dlya remontno-mekhanicheskikh cekhov i derevoobrabatyvayushchih promyshlennykh predpriyatij s uchetom tipovykh grafikov nagruzok]. *Obshchestvo. Nauka. Innovacii (NPK-2017)*, Kirov 01-29 April 2017, pp. 1052-1060 (in Russ.).
11. Yanchenko S.A., Cyruk S.A., Kulikov A.I. [Methods reducing the load of transformers in the networks with a high level of working current unsinusoidality]. *Promyshlennaya energetika*, 2017, no. 7, pp. 44-53 (in Russ.). ISSN: 0033-1155.
12. Kireeva E.A. [Features of power transformers operation]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont*, 2016, vol. 2, pp. 16-21 (in Russ.). ISSN: 2074-9635.
13. Kireeva E.A. [Features of power transformers operation]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont*, 2017, vol. 5-6, pp. 76-81 (in Russ.). ISSN: 2074-9635.
14. Zhezhelenko I.V. *Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatii* [Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984, 160 p. (in Russ.).
15. Barsukov V.K., Gizatullina O.L., Novoselov M.L. [Analysis of low-voltage electrical network operating parameters]. *Promyshlennaya energetika*, 2018, no. 9, pp. 17-24 (in Russ.). ISSN: 0033-1155.
16. Shnicer L.M. *Osnovy teorii i nagruzochnaya sposobnost' transformatorov* [Fundamentals of theory and load capacity of transformers]. Moscow, Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatel'stvo, 1959, 233 p. (in Russ.).

Analysis of Operating Modes of Oil-Immersed Power Transformers with a Voltage of 10 (6) / 0.4 kV

A.E. Fokeev, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

I.N. Tumakov, Master's Degree Student, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

The rate of thermal aging of the power transformers windings insulation depends on the effects of the electric field, mechanical stresses, temperature and processes that cause changes in these factors. A calculation algorithm is considered that allows determining the temperature of the most heated point of the windings of an oil power transformer at known values of the load current and ambient temperature.

Calculation of the most heated winding point temperature and the rate of thermal aging of insulation for an oil power transformer at different ambient temperatures during the year, different values and different spectral composition of the electric load current showed that in some cases it is possible to violate the permissible operating conditions of power transformers. According to the calculation results, the dependences of the thermal aging rate of insulation on the ambient temperature are constructed, with different load parameters and different load coefficients of power transformers. For the considered modes, in the warm season, the value of the thermal aging rate of insulation significantly exceeds the nominal value.

Based on mathematical models of oil power transformers with natural and forced oil circulation, expressions are obtained for determining the coefficient of reduction of the oil power transformers permissible load when the ambient temperature exceeds the normal value of 20 °C. On the basis of these expressions, for practical use, the dependences of the coefficient of reduction of the permissible load on the ambient temperature are constructed.

The influence of ambient temperature must be taken into account when choosing the power of oil power transformers, for which it is assumed to operate in full redundancy mode or high load factor values (≥ 0.8) in normal mode. To ensure the normative service life of the insulation of the windings, it is necessary to determine the design power of oil

power transformers using the coefficient of reduction of the permissible load under the influence of higher harmonics of the current and the coefficient of reduction of the permissible load under the influence of ambient temperature.

Keywords: oil power transformers, thermal aging rate of windings insulation, reduction of the nominal service life, higher current harmonics, ambient temperature.

Получено 06.10.2021

Образец цитирования

Фокеев А. Е., Тумаков И. Н. Анализ режимов работы масляных силовых трансформаторов напряжением 10(6)/0,4 кВ // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2021. Т. 24, № 4. С. 80–91. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-4-80-91.

For Citation

Fokeev A.E., Tumakov I.N. [Analysis of Operating Modes of Oil-Immersed Power Transformers with a Voltage of 10 (6) / 0.4 kV]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2021, vol. 24, no. 4, pp. 80-91 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2021-4-80-91.