

УДК 621.314.21

DOI: 10.22213/2413-1172-2020-1-65-74

## Выбор мощности силовых трансформаторов для подстанций напряжением 10(6)/0,4 кВ с учетом влияния нелинейной нагрузки

А. Е. Фокеев, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

А. А. Атрахманов, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Р. Р. Даутов, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*Рассмотрены факторы, влияющие на выбор мощности силовых трансформаторов для подстанций напряжением 10(6)/0,4 кВ. Приведен обзор методов, позволяющих оценить допустимый уровень загрузки силовых трансформаторов при несинусоидальном характере тока нагрузки. Сформулированы рекомендации по выбору расчетного коэффициента загрузки силовых трансформаторов в зависимости от конструкции трансформатора, эксплуатационных характеристик, принятого режима резервирования и доли ответственных потребителей электрической энергии. Предложен алгоритм выбора мощности силовых трансформаторов с учетом влияния несинусоидальных токов нагрузки, предполагающий использование коэффициента снижения допустимой нагрузки. Получены зависимости коэффициента снижения допустимой нагрузки от доли полной мощности нелинейных потребителей при различном гармоническом составе тока нагрузки. Установлено, что для рассматриваемых гармонических составов тока нагрузки при изменении доли полной мощности нелинейной нагрузки от 0 до 100 % значения коэффициента снижения допустимой нагрузки изменяются в пределах 1,0...0,712. Проанализированы результаты выбора номинальной мощности силовых трансформаторов по предложенному алгоритму при различных режимах резервирования (различных значениях расчетного коэффициента загрузки). Выбор мощности силовых трансформаторов производился для трех типовых объектов, характеризуемых различным гармоническим составом тока нагрузки, при изменении доли полной мощности нелинейных потребителей от 0 до 100 %. Установлено, что для обеспечения нормативного срока службы силовых трансформаторов в рассматриваемых случаях их номинальная мощность должна быть увеличена на 25...60 %.*

*Выбор мощности силовых трансформаторов с учетом влияния нелинейной нагрузки целесообразно осуществлять с использованием сведений о гармоническом составе тока нагрузки. Для этого на стадии расчета электрических нагрузок требуется определение расчетной полной мощности электроприемников, имеющих нелинейную вольт-амперную характеристику, и гармонического состава тока нагрузки.*

*Предложенный алгоритм выбора мощности силовых трансформаторов может быть использован в составе методики расчета электрических нагрузок и выбора силового электрооборудования при проектировании трансформаторных подстанций для промышленных объектов, инфраструктурных объектов, жилых и общественных зданий.*

**Ключевые слова:** силовые трансформаторы, нелинейная нагрузка, выбор номинальной мощности, коэффициент допустимой нагрузки.

**Введение**  
Трансформатор является важным элементом любой системы электроснабжения. Повреждения силовых трансформаторов, возникающие в процессе эксплуатации, как правило, требуют длительного ремонта на специализированных предприятиях (в мастерских) или у завода изготовителя.

Изменение режима электропотребления, обусловленное увеличением количества и номенклатуры электроприемников с нелинейной вольт-амперной характеристикой, характеризуется увеличением несинусоидальности тока в электрической сети. Дополнительный нагрев обмоток силовых трансформаторов, обусловленный высшими гармоническими составляющими то-

ка, приводит к необходимости снижения загрузки для обеспечения нормативного срока службы силового трансформатора.

Выражения, описывающие взаимосвязь перегрузки, увеличения температуры обмоток и сокращения срока службы для сухого силового трансформатора, приведены в ГОСТ Р 54419–2011 (МЭК 60076-12:2008) «Трансформаторы силовые. Ч. 12. Руководство по нагрузке сухого трансформатора».

Номинальный срок службы трансформатора, ч:

$$L = a \cdot \exp\left(\frac{b}{T}\right), \quad (1)$$

где  $a$  и  $b$  – постоянные уравнения Аррениуса, зависящие от температуры системы изоляции

в часах и кельвинах соответственно;  $T$  – постоянная термодинамической температуры наиболее нагретой точки обмотки, К.

Постоянная термодинамической температуры наиболее нагретой точки обмотки трансформатора, К:

$$T = 273 + \Theta_a + \Delta\Theta_{HSn}, \quad (2)$$

где  $\Theta_a$  – температура окружающей среды, °С;  $\Delta\Theta_{HSn}$  – разница температуры наиболее нагретой точки обмотки и температуры окружающей среды для заданной нагрузки, °С.

Температура наиболее нагретой точки обмотки трансформатора, °С:

$$\Delta\Theta_{HSn} = Z \cdot \Delta\Theta_{wr} \cdot I_n^q, \quad (3)$$

где  $I_n$  – единица параметра нагрузки;  $q$  – для трансформаторов с естественным воздушным охлаждением 1,6, для трансформаторов с принудительным охлаждением 2,0;  $Z$  – коэффициент, равный 1,25.

Существует несколько методов для определения допустимого тока силового трансформатора при наличии высших гармонических составляющих тока. Подробный анализ существующих методов [1] показал, что использование нормативного метода определения допустимой нагрузки (приведен в ANSI C57.110:2008 “IEEE recommended practice for establishing liquid-filled and dry-type power and distribution transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents - redline”) приводит к чрезмерному завышению мощности трансформатора. Экспериментальные методы – косвенное измерение потерь [2] и измерение частотной характеристики сопротивления обмоток [3] – отличаются меньшей степенью абстракции и позволяют более точно определять допустимый ток трансформатора. При общих исходных данных значение допустимого тока силового трансформатора при расчете по нормативному методу составило 58 % номинального тока, при использовании экспериментальных методов – 79...83 % номинального тока.

В [4] приведен экспериментальный способ анализа электрической сети путем построения трехфазного годографа, который может быть использован для сравнительной оценки номинальных и фактических эксплуатационных режимов силового электрооборудования.

Необходимо отметить, что реализация нормативного метода требует предварительного определения гармонического состава тока нагрузки, а реализация экспериментальных методов предполагает измерение мгновенных значе-

ний токов и напряжений с последующей обработкой посредством специализированного программного обеспечения. На стадии разработки проектных решений по электроснабжению выбор мощности силовых трансформаторов с применением экспериментальных методов затруднителен.

Представляется актуальной задача разработки алгоритма для выбора мощности силовых трансформаторов на этапе проектирования с учетом влияния нелинейной нагрузки при минимальном наборе исходных данных.

Целью исследования является разработка алгоритма выбора мощности силовых трансформаторов и анализ результатов его применения для объектов с различным гармоническим составом тока нагрузки.

#### **Факторы, влияющие на выбор мощности трансформаторов**

Основными факторами, влияющими на выбор мощности силовых трансформаторов, являются:

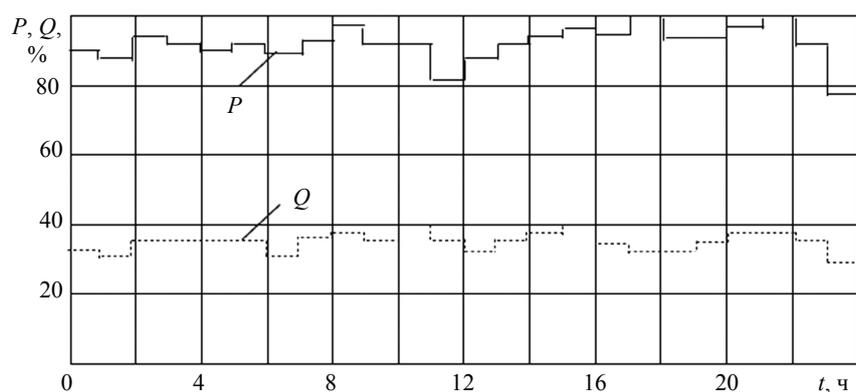
- требуемая категория надежности электрообеспечения объекта;
- форма и параметры графика электрической нагрузки объекта;
- характер электрической нагрузки;
- температурные условия эксплуатации;
- нагрузочная и перегрузочная способности трансформатора;
- экономическая целесообразность;
- перспектива увеличения электрической нагрузки объекта.

Правилами устройства электроустановок (ПУЭ, 7-е изд., утв. приказом Министерства энергетики РФ от 08.07.2002 № 204) предусмотрена общая классификация потребителей электрической энергии в части обеспечения надежности электроснабжения на три категории. Кроме того, в составе первой категории выделяется особая группа потребителей. Классификация предполагает определение категории потребителя по принципу оценки последствий, возникающих при нарушении электрообеспечения потребителя. На основе общей классификации потребителей по категориям в части обеспечения надежности электроснабжения в соответствующих нормативных документах приведена информация по отнесению конкретных потребителей (электроприемников) к определенной категории: для промышленных объектов (НТП ЭПП-94 «Проектирование электроснабжения промышленных предприятий»), для жилых и общественных зданий (СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жи-

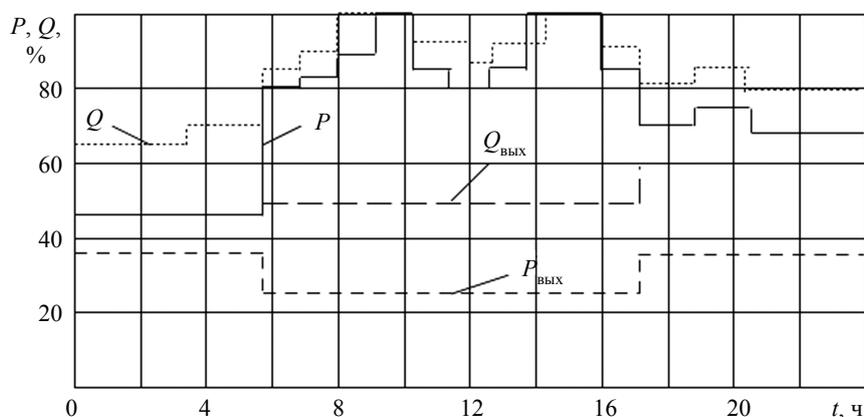
лых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа»), для объектов инфраструктуры (например, СП 41-101-95 «Проектирование тепловых пунктов»). Собственник объекта может принять решение о повышении категории надежности электроснабжения самостоятельно. В этом случае потребуется не только реализация подключения к дополнительному независимому источнику электроснабжения, но и пересмотр эксплуатационных режимов силовых трансформаторов объекта.

Графики электрических нагрузок для объектов с различным режимом работы и технологи-

ческими особенностями производства могут существенно отличаться (рис. 1). Встречается подход [5], при котором для объектов с графиком электрических нагрузок, имеющим один или два ярко выраженных максимума (рис. 1, *b*), используется перегрузочная способность силовых трансформаторов. В этом случае значение номинальной мощности трансформатора (двух трансформаторов) выбирается близким к максимальной нагрузке, предполагая работу трансформаторов с допускаемой систематической перегрузкой в нормальном режиме в часы максимума нагрузки.



a



b

Рис. 1. Суточный график электрической нагрузки объекта без ярко выраженного максимума (*a*) и с двумя ярко выраженными максимумами (*b*):  $P, Q$  – активная и реактивная мощность;  $P_{\text{вых}}, Q_{\text{вых}}$  – активная и реактивная мощность в выходные дни

Fig. 1. Daily schedule of the object's electrical load, without a pronounced maximum (*a*) and with two pronounced maxima (*b*):  $P, Q$  – active and reactive power;  $P_{\text{vuh}}, Q_{\text{vuh}}$  – active and reactive power for weekend

Аспекты влияния нелинейного характера нагрузки на силовые трансформаторы и способы его оценки кратко описаны в начале статьи. Кроме высших гармонических составляющих на работу силовых трансформаторов может влиять ударный характер нагрузки, связанный с частыми тяжелыми пусками крупных электрических

машин (крупные насосы и вентиляторы, компрессора, приводы прокатных станков) и частыми коммутациями значительных электрических нагрузок (электрические котлы большой мощности).

Производители силовых трансформаторов приводят номинальные параметры (мощность,

потери, срок службы) для номинальных условий эксплуатации. В качестве номинальных условий эксплуатации рассматриваются: температура воздуха в помещении +40 °С и относительная влажность до 98 % (исполнение УХЛЗ по ГОСТ 15150–69 «Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов»). Для обеспечения этих условий производители силовых трансформаторов предписывают организовывать систему естественной или принудительной вентиляции, производительность которой напрямую зависит от потерь активной мощности в силовом трансформаторе, а значит, от его номинальной мощности и коэффициента загрузки. Определения нагрузочной способности, систематической допускаемой перегрузки, перегрузочной способности и допустимой аварийной перегрузки приведены в ГОСТ 16110–82 «Трансформаторы силовые. Термины и определения».

Допускаемая аварийная перегрузка силовых трансформаторов регламентирована в Правилах технической эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭЭП, утверждены приказом Министерства энергетики Российской Федерации от 13.01.2003 № 6). Для масляных трансформаторов допускается продолжительная нагрузка любой обмотки током, превышающим на 5 % номинальный при условии работы на номинальном напряжении. Продолжительные допустимые нагрузки и систематические перегрузки сухих трансформаторов устанавливаются техническими условиями заводов-изготовителей и, как правило, зависят от способа охлаждения (естественное, принудительное), конструктивного исполнения трансформатора (жидкий диэлектрик, воздушно-барьерная изоляция, литая изоляция) и температурных условий эксплуатации. Подробный сравнительный анализ технических характеристик и технико-экономических показателей различных типов силовых трансформаторов 10(6)/0,4 кВ приведен в [6–9].

Фактор экономической целесообразности при выборе мощности силового трансформатора связан, во-первых, с критерием минимума приведенных годовых затрат [10]; во-вторых, с унификацией типоразмеров силовых трансформаторов в электрическом хозяйстве объекта (неактуально для объектов с небольшим количеством подстанций 10(6)/0,4 кВ).

Существующее разнообразие технических решений позволяет интегрировать пункты приема, трансформации и распределения электрической энергии на любые объекты, которые

могут иметь уникальные территориальные, климатические и другие особенности. Несмотря на это, вопрос перспективного проектирования систем электроснабжения остается актуальным и для классов напряжения 10(6)/0,4 кВ, а влияние вышерассмотренных факторов только повышает важность такого подхода.

### **Действующие нормативы и практика проектирования**

Несмотря на декларируемые производителями перегрузочные способности силовых трансформаторов в течение «продолжительного времени» (такого определения не существует в ГОСТ 16110–82), следует понимать, что при отклонении от номинальных условий температура обмоток силового трансформатора увеличивается. Следовательно, увеличивается интенсивность процесса старения изоляции и сокращается срок службы силового трансформатора.

Известно, что максимальный коэффициент полезного действия силового трансформатора достигается при значении коэффициента загрузки 0,75...0,8. Классическая практика проектирования предполагает применение следующих значений коэффициентов загрузки:

- 0,6...0,7 при преобладании потребителей 1-й категории в части обеспечения надежности электроснабжения (до 80 %);
- 0,7...0,8 при преобладании потребителей 2-й категории;
- до 1,0 при питании потребителей 3-й категории.

Учет вышеописанных факторов, влияющих на выбор мощности силовых трансформаторов, был положен в основу норм технологического проектирования НТП ЭПП-94, в которых приведены соотношения коэффициентов допустимой перегрузки в аварийном режиме и коэффициентов загрузки силовых масляных трансформаторов в нормальном режиме.

Современная практика проектирования трансформаторных подстанций напряжением 10(6)/0,4 кВ, как правило, предусматривает выбор мощности трансформаторов для обеспечения коэффициента допустимой перегрузки силовых трансформаторов не более значения 1,0. При этом значение коэффициента загрузки в нормальном режиме составляет не более 0,5, несмотря на увеличение приведенных годовых затрат. Отчасти подобный подход априорно нивелирует негативное влияние высших гармонических составляющих и температурных условий на силовые трансформаторы и позволяет при необходимости увеличить мощность электрической нагрузки.

**Выбор коэффициентов загрузки и снижения допустимой загрузки силовых трансформаторов**

На основании вышеизложенных требований нормативно-технических документов и эксплуатационных характеристик различных типов силовых трансформаторов сформулированы рекомендации по выбору расчетного коэффициента загрузки силового трансформатора при различных режимах резервирования (табл. 1).

Для определения коэффициента снижения допустимой нагрузки в некоторых странах практикуется использование зависимости допустимой загрузки трансформатора от доли полной мощности нелинейной нагрузки (рис. 2) из IEEE 519-P519AD5-1996 “Guide for Applying Harmonics Limits”. Однако данная зависимость не отражает взаимосвязь снижения допустимой нагрузки и фактического гармонического состава тока нагрузки, определяющего дополнительный нагрев силового трансформатора.

Таблица 1. Расчетные значения коэффициента загрузки

Table 1. Estimated load factor values

Рекомендации по применению силовых трансформаторов различного типа	Нагрузка трансформатора в режиме резервирования, %	Доля потребителей 1-й категории, %	Значения расчетного коэффициента загрузки в нормальном режиме, при кол-ве трансформаторов	
			два	три
ТМ, ТС, ТСЛ	80	100	0,4	0,266
	90	100	0,45	0,3
ТМ, ТС	100	100	0,5	0,666
	110	90	0,55	0,735
ТМ, ТС <sub>Al+п.в.</sub> , ТС <sub>Cu</sub>	120	80	0,6	0,8
ТМ, ТС <sub>Cu+п.в.</sub>	130	70	0,65	0,86
	140	60	0,7	0,93

ТМ – масляные трансформаторы; ТС – сухие трансформаторы с воздушно-барьерной изоляцией; ТСЛ – сухие трансформаторы с литой изоляцией; индекс Al – обмотки из алюминия; индекс Cu – обмотки из меди; индекс п.в – принудительная вентиляция обмоток.

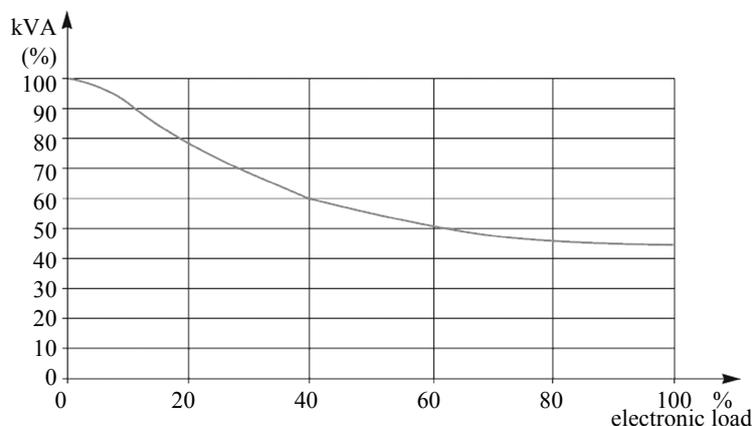


Рис. 2. Зависимость допустимой нагрузки трансформатора  $S_{тр.д}$  от доли полной мощности нелинейной нагрузки  $N_{н.н}$

Fig. 2. Dependence of transformer permissible load  $S_{tr.p}$  from the share of the total power of the nonlinear load  $N_{l,l}$

Наиболее целесообразным для определения коэффициента снижения допустимой нагрузки силового трансформатора является использование положений стандарта UTE C-15-112-2000 “Effects of current on human beings and livestock”, предполагающих расчет коэффициента снижения допустимой нагрузки трансформатора по выражению

$$K_{с.д.н} = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,1 \left( \sum_{h=2}^{40} h^{1,6} \frac{I_h^2}{I_1} \right)}}, \quad (4)$$

где  $I_h$  – действующее значение гармонической составляющей тока нагрузки, А;  $h$  – порядок гармонической составляющей тока;  $I_1$  – дейст-

вующее значение первой гармонической составляющей тока нагрузки, А.

С использованием выражения (4) получены зависимости коэффициента  $K_{с.д.н}$  от доли полной мощности нелинейной нагрузки  $N_{н.н}$  (рис. 3) для типовых гармонических составов (спектров) тока нагрузки из табл. 2.

Анализируя зависимости, представленные на рис. 2 и 3, необходимо отметить, что использование зависимости  $S_{тр.д} = f(N_{н.н})$  на рис. 2 приводит к значительному завышению мощности трансформаторов. Так, при доле полной мощно-

сти нелинейных потребителей  $N_{н.н} = 50\%$  допустимая нагрузка трансформатора составляет 55 %, следовательно, коэффициент снижения допустимой нагрузки составит 0,55. При аналогичных исходных данных по зависимости  $K_{с.д.н} = f(N_{н.н})$  (рис. 3) значения коэффициента  $K_{с.д.н}$  изменяются в пределах 0,916...0,933. Таким образом, для определения коэффициента  $K_{с.д.н}$  предпочтительным будет использование выражения (4) или зависимостей  $K_{с.д.н} = f(N_{н.н})$  (рис. 3), которые учитывают гармонический состав тока нагрузки.

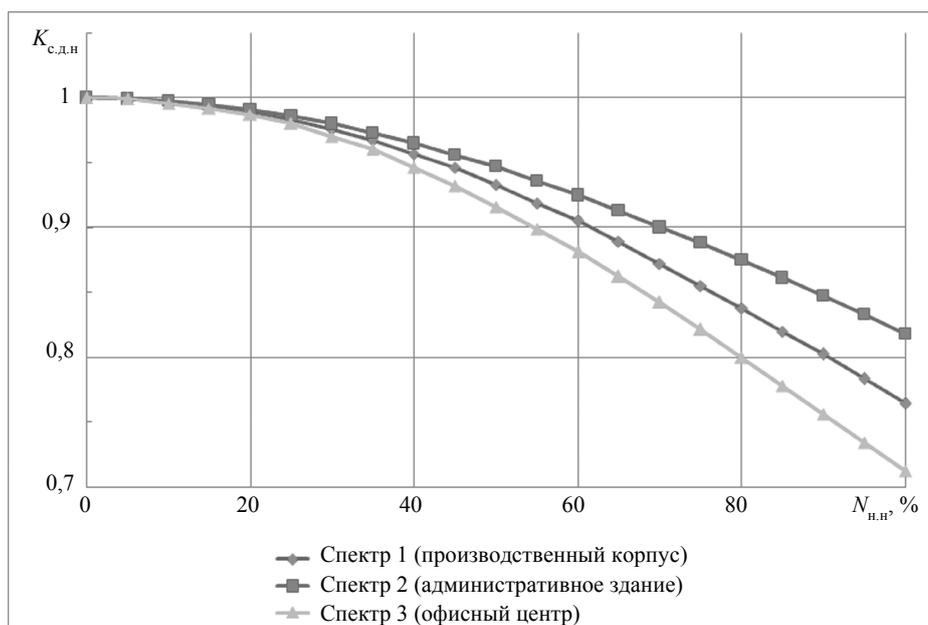


Рис. 3. Зависимости коэффициента снижения допустимой нагрузки  $K_{с.д.н}$  трансформатора от доли полной мощности нелинейной нагрузки  $N_{н.н}$  для различных спектров тока нагрузки

Fig. 3. Dependence of the coefficient of transformer permissible load reduction  $K_{p,l}$  from the share of the total power of the nonlinear load  $N_{l,l}$  for different spectra of load current

Таблица 2. Параметры электрической нагрузки объектов

Table 2. Parameters of the electric load of objects

Параметр	Ед. измерения	Значение для объекта		
		Производственный корпус	Административное здание	Офисный центр
Полная расчетная мощность $S_p$	кВА	1260		
Ток нагрузки $I_{rms}$ , А	А	1819		
Номер спектра тока		1	2	3
Гармонический состав тока нагрузки	$I_3$	10	25	55
	$I_5$	55	12	35
	$I_7$	30	10	30
	$I_9$	2	9	15
	$I_{11}$	9	9	8
	$I_{13}$	7	6	5
	$I_{15}$	1	6	8
	$I_{17}$	4	5	5
	$I_{19}$	3	6	5
	$I_{23}$	2	8	8
$I_{25}$	2	9	8	

### Алгоритм выбора мощности силовых трансформаторов

Сформулирован следующий алгоритм выбора мощности силовых трансформаторов, учитывающий влияние нелинейной нагрузки на эксплуатационные режимы силовых трансформаторов.

1. Принимается расчетный коэффициент загрузки силового трансформатора в нормальном режиме  $K_3$  с учетом категории надежности потребителей и эксплуатационных характеристик применяемых трансформаторов (см. табл. 1).

2. Определяется предварительная расчетная мощность силового трансформатора, кВА:

$$S_{\text{тр.п.предв}} = \frac{S_p}{nK_3}, \quad (5)$$

где  $S_p$  – расчетная полная мощность электрической нагрузки объекта, кВА, определяемая с учетом рекомендаций [11];  $K_3$  – принятый расчетный коэффициент загрузки трансформатора в нормальном режиме;  $n$  – количество трансформаторов.

3. Выбирается предварительная номинальная мощность трансформатора, ближайшая из типового ряда мощностей, кВА:

$$S_{\text{тр.н.предв}} \geq S_{\text{тр.п.предв}}. \quad (6)$$

4. Определяется доля полной мощности нелинейной нагрузки от предварительной номинальной полной мощности силового трансформатора, %:

$$N_{\text{н.н}} = \frac{S_{\text{н.н}}}{nS_{\text{тр.н.предв}}} \cdot 100, \quad (7)$$

где  $S_{\text{н.н}}$  – расчетная полная мощность потребителей с нелинейной вольт-амперной характеристикой, определяемая в процессе расчета электрических нагрузок.

5. Определяется коэффициент снижения допустимой нагрузки силового трансформатора  $K_{\text{с.д.н}}$  по выражению (4) или по рис. 3 в зависимости от наличия исходных данных.

6. Определяется расчетная мощность трансформатора, кВА:

$$S_{\text{тр.р}} = \frac{S_p}{nK_3K_{\text{с.д.н}}}. \quad (8)$$

7. Выбирается номинальная мощность трансформатора, ближайшая из типового ряда мощностей, кВА:

$$S_{\text{тр.н}} \geq S_{\text{тр.р}}. \quad (9)$$

8. Фактический коэффициент загрузки силового трансформатора, мощность которого определена с учетом влияния нелинейных потребителей:

$$K_{\text{з.факт}} = \frac{S_p}{S_{\text{тр.н}}}. \quad (10)$$

### Анализ результатов выбора мощности силовых трансформаторов

Для трех объектов, имеющих одинаковую расчетную полную мощность  $S_p$ , но отличных по гармоническому составу тока нагрузки, – промышленный корпус, административное здание и офисный центр – выполнен выбор мощности силовых трансформаторов с учетом нелинейного характера нагрузки по предложенному алгоритму. Исходные данные по рассматриваемым объектам приведены в табл. 2. Для удобства отображения результатов расчета и их интерпретации относительно гармонического состава тока нагрузки для каждого объекта введена нумерация спектра тока нагрузки.

Гармонический состав тока нелинейной нагрузки производственного корпуса соответствует типовому гармоническому составу тока преобразователей частоты, имеющих входной трехфазный неуправляемый выпрямитель. 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.

Выбор мощности силовых трансформаторов производился при изменении доли полной мощности нелинейной нагрузки  $N_{\text{н.н}}$  в диапазоне 0...100 % полной расчетной мощности объекта с шагом 5 %. Рассматривались различные режимы резервирования трансформаторов – значения расчетного коэффициента загрузки  $K_3 = 0,4...0,7$  с шагом 0,1.

Выбор мощности силовых трансформаторов с использованием выражений (6) и (9) осуществлялся из типового ряда мощностей 630...4000 кВА с возможностью отклонения от неравенства в пределах 5 % от номинальной мощности трансформатора. Рассматривался классический вариант трансформаторной подстанции напряжением 10(6)/0,4 кВ с двумя трансформаторами.

По результатам выбора мощности силовых трансформаторов рассматриваемых объектов для различных вариантов резервирования трансформаторов построены зависимости но-

минальной мощности трансформатора  $S_{тр.н}$  от доли полной мощности нелинейной нагрузки  $N_{н.н}$  при различном гармоническом составе тока нагрузки (рис. 4).

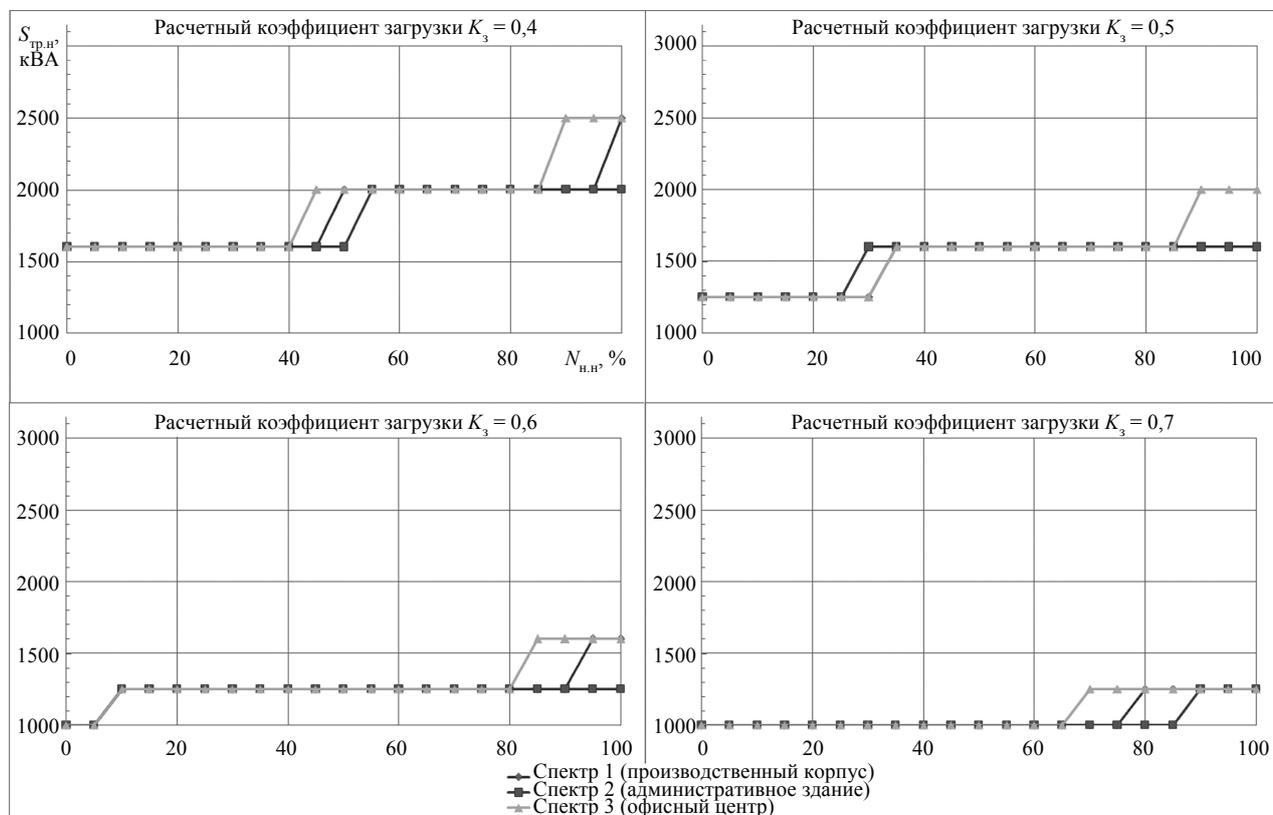


Рис. 4. Зависимости  $S_{тр.н} = f(N_{н.н})$  при различных спектрах тока нагрузки и различных режимах резервирования

Fig. 4. Dependence  $S_{tr.n} = f(N_{l.i})$  for different spectra of load current and different backup modes

Из данных, приведенных на рис. 4, следует, что увеличение номинальной мощности силового трансформатора при питании нелинейных нагрузок с целью обеспечения его нормативного срока службы зависит от гармонического состава тока нагрузки и принятого режима резервирования. Так, при наличии нелинейной нагрузки промышленного типа (преобразователи частоты) номинальная мощность силового трансформатора должна увеличиваться на 25 % при доле полной мощности нелинейной нагрузки  $N_{н.н} = 50\%$  для ответственных потребителей. Для офисных зданий увеличение номинальной мощности трансформатора на 25 % требуется уже при значении  $N_{н.н} = 40\%$ , что обусловлено увеличением доли гармонических составляющих кратных трем (3, 9, 15) в спектральном составе тока нагрузки. При увеличении доли полной мощности нелинейной нагрузки  $N_{н.н}$  необходимость увеличения номинальной мощности силовых трансформаторов может достигать 55 % (для промыш-

ленных объектов с высоким уровнем автоматизации электропривода при  $K_3 = 0,4$ ) и 60 % (в офисных зданиях с коэффициентами загрузки трансформаторов  $K_3 = 0,4 \dots 0,5$ ). При меньшей доле ответственных потребителей ( $K_3 = 0,7$ ) необходимое увеличение мощности силовых трансформаторов не превышает 25 % для любого из рассматриваемых объектов.

#### Выводы

1. Важнейшим этапом выбора мощности силового трансформатора является выбор расчетного значения коэффициента загрузки силового трансформатора в нормальном режиме. При выборе коэффициента загрузки кроме доли полной мощности ответственных потребителей обязательно должны учитываться тип силового трансформатора и его эксплуатационные характеристики. Для некоторых типов трансформаторов значение расчетного коэффициента загрузки при питании ответственных потребителей не должно превышать значений в пределах  $0,4 \dots 0,45$ .

2. На выбор мощности силовых трансформаторов значительное влияние оказывает наличие в составе электрической нагрузки электроприемников с нелинейной вольт-амперной характеристикой. Для обеспечения нормативного срока службы силовых трансформаторов в условиях несинусоидальных токов нагрузки их номинальная мощность должна быть увеличена на 25...60 % (для рассмотренных объектов) в зависимости от доли полной мощности нелинейной нагрузки и гармонического состава тока нагрузки.

3. Выбор мощности силовых трансформаторов с учетом влияния нелинейной нагрузки целесообразно осуществлять с использованием сведений о гармоническом составе тока нагрузки. Для этого на стадии расчета электрических нагрузок требуется определение расчетной полной мощности электроприемников, имеющих нелинейную вольт-амперную характеристику, и гармонического состава тока нагрузки.

4. Предложенный алгоритм выбора мощности силовых трансформаторов может быть использован в составе методики расчета электрических нагрузок и выбора силового электрооборудования при проектировании трансформаторных подстанций для промышленных объектов, инфраструктурных объектов, жилых и общественных зданий.

#### Библиографические ссылки

1. 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.

2. Fuchs E.F., Lin D., Martynaitis J. [Measurement of three-phase transformer derating and reactive power demand under nonlinear loading conditions]. *IEEE Transactions Power Del.*, 2006, vol. 21, no. 2.

3. Kelley A.W., Edwards S.W., Rhode J.P., Baran M.E. [Transformer derating for harmonic currents: a wide-band measurement approach for energized transformers]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1999, vol. 35, no. 6.

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

5. Ермаков В. Ф., Зайцева И. В. Выбор электрооборудования по нагреву : монография. Ростов-на-Дону : Книга, 2018. 176 с.

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

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

8. Савинцев Ю. М., Микрюков А. П. Сравнительный анализ технико-экономических показателей сухих силовых трансформаторов с воздушно-барьерной и литой изоляцией // Новое в российской электроэнергетике. 2014. № 6. С. 38–44.

9. Протацкая А. А., Ваганов А. Р., Искандеров Р. О. Сравнение сухих и масляных трансформаторов // Наука среди нас. 2018. № 1 (5). С. 114–118.

10. 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.

11. Fokeev A.E., Sibgatullin B.I., Yossef I.A. [Methods of electrical loads calculation and selection of electrical power equipment]. *International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems - 2019* (Ufa, 22-25 October, 2019).

#### References

1. Yanchenko S.A., Tsyruk S.A., Kulikov A.I. [Analysis of transformer unloading methods in networks with a high level of current non-sinusoidality]. *Pro-myshlennaya energetika*, 2017, no. 7, pp. 44-53 (in Russ.).

2. Fuchs E.F., Lin D., Martynaitis J. [Measurement of three-phase transformer derating and reactive power demand under nonlinear loading conditions]. *IEEE Transactions Power Del.*, 2006, vol. 21, no. 2.

3. Kelley A.W., Edwards S.W., Rhode J.P., Baran M.E. [Transformer derating for harmonic currents: a wide-band measurement approach for energized transformers]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1999, vol. 35, no. 6.

4. Barsukov V.K., Gizatullina O.L., Novoselov M.L. [Analysis of the parameters of the low-voltage three-phase electric network]. *Pro-myshlennaya energetika*, 2018, no. 9, pp. 17-24 (in Russ.).

5. Ermakov V.F., Zaitseva I.V. *Vybor elektrooborudovaniya po nagrevu* [Choice of electrical equipment for heating]. Rostov-na-Donu, Kniga Publ., 2018, 176 p. (in Russ.).

6. Kireeva E.A. [Features of the operation of power transformers]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont*, 2016, no. 2, pp. 16-21 (in Russ.).

7. Kireeva E.A. [Features of the operation of power transformers]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont*, 2017, no. 5-6, pp. 76-81 (in Russ.).

8. Savintsev Yu.M., Mikryukov A.P. [Comparative analysis of technical and economic indicators of dry power transformers with air-barrier and cast insulation]. *Novoe v rossiiskoi elektroenergetike*, 2014, no. 6, pp. 38-44 (in Russ.).

9. Protatskaya A.A., Vaganov A.R., Iskanderov R.O. [Comparison of dry and oil transformers]. *Nauka sredi nas*, 2018, no. 1, pp. 114-118 (in Russ.).

10. Fursanov M.I., Dul' I.I. [Choice of rated power of power transformers]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob'edinenii SNG. Energetika*, 2015, no. 2, pp. 11-20 (in Russ.).

11. Fokeev A.E., Sibgatullin B.I., Yossef I.A. [Methods of electrical loads calculation and selection of electrical power equipment]. *International Conference on*

*Electrotechnical Complexes and Systems* - 2019 (Ufa, 22-25 October, 2019).

### Selecting the Power Transformers Rated for 10(6)/0.4 kv Substations Taking into Account the Influence of Nonlinear Load

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

A.A. Atrahmanov, Master's Degree Student, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

R.R. Dautov, Master's Degree Student, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*The factors influencing the choice of power transformers rated for substations with a voltage of 10(6)/0,4 kV are considered. A review of methods that allow for estimating the permissible load level of power transformers with a non-sinusoidal nature of the load current is given. The requirements of normative and technical documents regarding compliance with operating modes of power transformers are presented.*

*Recommendations on the choice of the calculated load factor KL of power transformers depending on the design of the transformer, operational characteristics, the adopted backup mode and the share of responsible consumers of electric energy are formulated.*

*An algorithm for selecting the power transformers rated STR.N is proposed, taking into account the influence of non-sinusoidal load currents, which assumes the use of the coefficient of reduction of the permissible load of the KPL. The dependences of the coefficient KPL on the share of the nonlinear consumers total power NLL with different harmonic composition of the load current are obtained. It is established that for the considered harmonic compositions of the load current, when the NLL values change from 0 to 100%, the values of the KPL coefficient change in the range from 1.0 to 0.712.*

*The results of selecting the power transformers rated according to the proposed algorithm are analyzed for different backup modes (different values of the calculated load factor KL). The power transformers rated was selected for three typical objects characterized by different harmonic composition of the load current, with a change in the share of the total power of non-linear consumers NLL from 0 to 100 %. It is established that in order to ensure the standard service life of power transformers in these cases, their rated power STR.N should be increased by 25...60 %.*

*It is advisable to select the power transformers rated taking into account the influence of non-linear load using information about the harmonic composition of the load current. For this purpose, the stage of calculating the electrical loads should involve the definition of the full design power of electric devices that have nonlinear current-voltage characteristic and of the harmonic part of the load current.*

*The proposed algorithm for selecting the power transformers rated can be used as part of the method for calculating electrical loads and selecting the power electrical equipment when designing transformer substations for industrial facilities, infrastructure facilities, residential and public buildings.*

**Keywords:** power transformers, non-linear loads, selection of power transformers rated, load factor, coefficient of permissible load.

Получено 17.02.2020.

#### Образец цитирования

Фокеев А. Е., Атрахманов А. А., Даутов Р. Р. Выбор мощности силовых трансформаторов для подстанций напряжением 10(6)/0,4 кВ с учетом влияния нелинейной нагрузки // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 1. С. 65–74. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-1-65-74.

#### For Citation

Fokeev A.E., Atrahmanov A.A., Dautov R.R. [Selecting the Power Transformers Rated for 10(6)/0.4 kv Substations Taking into Account the Influence of Nonlinear Load]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2020, vol. 23, no. 1, pp. 65-74 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2020-1-65-74.