

УДК 621.311

## ВЫБОР НОМИНАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Докт. техн. наук, проф. ФУРСАНОВ М. И., асп. ДУЛЬ И. И.

*Белорусский национальный технический университет*

E-mail: IvanDul88@gmail.com

Предложен способ выбора номинальной мощности силовых масляных трансформаторов с учетом более точного расчета их нагрузочной способности. Аргументирован более точный метод определения нагрузочной способности силовых масляных трансформаторов, допускаемый действующими нормативными техническими документами. Основное внимание уделено анализу требований нормативных технических документов по выбору номинальной мощности силовых масляных трансформаторов. Проведен критический анализ сложившегося предельно упрощенного метода выбора номинальной мощности силовых трансформаторов и обоснована его несостоятельность. Выполнены обзор и анализ существующих нормативных технических документов по выбору номинальной мощности силовых масляных трансформаторов. Проанализирована эволюция требований нормативных технических документов.

Показано, что все методы выбора номинальной мощности силовых трансформаторов являются упрощениями метода определения допустимых нагрузок трансформаторов, основанного на расчете тепловых переходных процессов. Аргументировано, что требования о допустимости любого режима работы трансформатора наиболее точно могут быть выражены в виде допустимых температур критических точек, а допустимые коэффициенты перегрузки, используемые в большинстве применяемых методов, являются лишь косвенно определяемыми величинами. Приведены значения допустимых температур критических точек, регламентированные нормативными техническими документами.

Указаны возможные ошибки упрощенного метода выбора номинальной мощности силовых масляных трансформаторов. Для иллюстрации возможных ошибок приведены результаты расчетов математического моделирования тепловых переходных процессов в трансформаторах при принятых в упрощенном методе условиях. Результаты расчетов тепловых переходных процессов в трансформаторе для произвольного графика электрических нагрузок продолжительностью 168 ч демонстрируют возможности предлагаемого метода.

**Ключевые слова:** силовые масляные трансформаторы, нагрузочная способность, тепловые переходные процессы, математическое моделирование.

Ил. 3. Табл. 1. Библиогр.: 12 назв.

## SELECTING RATED CAPACITY FOR POWER TRANSFORMERS

FURSANOV M. I., DUL I. I.

*Belorussian National Technical University*

The article proposes a method for selecting the rated capacity of oil-immersed power transformers adjusted for a more accurate calculation of their load-carrying capability. A more precise method to determine load-carrying capability of oil-immersed power transformers, which is admissible with valid technological normative documents, is offered and reasoned. The major attention focuses on the analysis of the requirements of the technological normative documents on selecting the rated capacity of oil-immersed power transformers. The authors present the critical analysis of the well-established and extremely simplified method for rated-capacity selection of power transformers and justify its inconsistency.

The paper shows that all the methods for selecting power-transformers rated capacity are the simplifications of the transformers load-capability assessment method based on thermal

transient-processes computations. It is reasoned that the requirements of any transformer operational-mode acceptability can be most precisely expressed in the form of critical-point allowable temperatures and the allowable overload-factors used in most applied methods are only indirectly calculated values. Allowable-temperature critical points regimented by the technological normative documents are cited.

The authors point to possible errors of the simplified selection-methods for rated capacity of oil-immersed transformers and adduce the computation results of the mathematical modeling of the thermal transient-processes under simplified conditions assumption to illustrate the possible errors. The thermal transient-processes computation results for a transformer with a 168-hour random electrical-load list demonstrate the performance capabilities of the offered method.

**Keywords:** oil-immersed power transformers, load-carrying capability, thermal transient processes, mathematical modeling.

Fig. 3. Tab. 1. Ref.: 12 titles.

В существующей практике проектирования выбор номинальной мощности силовых трансформаторов чаще всего производится на основе упрощенного классического метода [1, 2]. Суть его состоит в учете допустимой нагрузки трансформатора в аварийном режиме с помощью коэффициента аварийной перегрузки  $k_{ав}$ . Метод предназначен для выбора мощности трансформатора на двухтрансформаторной подстанции и рассматривает режим работы при аварийном отключении одного из трансформаторов.

Формула для расчета коэффициента аварийной перегрузки трансформатора записывается в виде

$$k_{ав} = \frac{S_{\max ав}}{S_{тр.ном}} \leq 1,4, \quad (1)$$

где  $S_{\max ав}$  – максимальная нагрузка подстанции с учетом возможного резервирования части нагрузки по сетям низкого напряжения;  $S_{тр.ном}$  – номинальная мощность трансформатора.

В соответствии с классическим методом значение коэффициента аварийной перегрузки принимается равным 1,4 и аргументируется требованиями СП 34.20.501 [3]. Однако без должного внимания остаются значимые детали. В действующей редакции [3] приведена следующая директива: «Допускается перегрузка масляных трансформаторов сверх номинального тока до 40 % общей продолжительностью не более 6 ч в сутки в течение пяти суток подряд при полном использовании всех устройств охлаждения трансформатора, если подобная перегрузка не обусловлена требованиями, указанными в инструкции по эксплуатации трансформаторов или нормативных технических документах».

Следует обратить внимание на следующие две части указанной директивы [3]:

- первая описывает технические параметры и условия;
- вторая ссылается на возможные требования инструкции по эксплуатации.

Что касается первой части [3], то самое раннее упоминание приведенных в нем требований встречалось в Правилах устройства электроуста-

новок 3-го (экземпляр 1964 г.) и 4-го изданий (1966 г.). В 1977 г. данные требования в более поздних версиях 4-го издания ПУЭ были упразднены. Требования директивы [3] присутствовали также в ГОСТ 14209–69 [4]: «В аварийных случаях, если коэффициент начальной нагрузки не более 0,93, трансформаторы с системами охлаждения М, Д, ДЦ и Ц допускают в течение не более 5 суток перегрузку на 40 % сверх номинального тока на время максимумов нагрузки общей продолжительностью не более 6 ч в сутки. При этом необходимо принять все меры для усиления охлаждения трансформатора (включение вентиляторов дутья, резервных охладителей и т. д.)». В настоящее время ГОСТ 14209–69 заменен на ГОСТ 14209–85 [5]. В [5] сформулированы требования, аналогичные приведенным в [3], однако формулировки [5] значительно расширены и предусматривают ряд дополнительных условий, отсутствующих в классическом методе.

Проанализируем вторую часть директивы [3], в соответствии с которой перегрузка трансформатора не была обусловлена нормами инструкции по эксплуатации трансформаторов или нормативными техническими документами. В настоящее время в Республике Беларусь действует СТП 09110.46.500–05 [6]. Требования данного документа в части нагрузочной способности трансформаторов основываются и согласуются [5]. Проанализируем основные требования [5].

При определении допустимой нагрузки трансформатора в [5] предусмотрен учет следующих параметров:

- продолжительность перегрузки (в классическом методе принята 6 ч);
- параметры теплоотдачи трансформатора;
- температура окружающей среды (в классическом методе принята 20 °С);
- форма графика электрических нагрузок.

При этом для трансформаторов с номинальным напряжением до 110 кВ и номинальной мощностью до 100 МВ·А коэффициент аварийной перегрузки при принятых в классическом методе условиях составляет от 1,3 до 1,4 (при предшествующей нагрузке, не превышающей 0,9, коэффициент равен 1,4). Для трансформаторов с номинальным напряжением выше 110 кВ и мощностью до 100 МВ·А коэффициент перегрузки составит от 1,1 до 1,2. При вариации указанных выше параметров ГОСТ 14209–85 [5] допускает коэффициент аварийной перегрузки от 1,1 до 2,0.

Таким образом, выбор номинальной мощности трансформатора на основе классического метода при приведенном в [3] значении перегрузки 40 % из-за неучтенных параметров может быть ошибочным. В таком случае в процессе эксплуатации могут возникнуть аварийные ситуации из-за отказа трансформатора, а также необоснованно завышенный объем инвестиций в строительство электросетевых объектов. Наиболее простой метод выбора номинальной мощности трансформаторов при проектировании систем электроснабжения [5] предусматривает различные значения допустимого коэффициента перегрузки (табл. 1).

Из табл. 1 видно, что даже самый простой метод выбора номинальной мощности трансформаторов по [5] предусматривает учет длительности перегрузки, системы охлаждения и температуры охлаждающего воздуха.

Таблица 1

**Допустимые аварийные перегрузки трансформаторов\* при выборе их номинальной мощности для промышленных подстанций при предшествующей нагрузке, не превышающей 0,8**

Продолжительность перегрузки в течение суток, ч	Перегрузка, в долях номинального тока, в зависимости от эквивалентной температуры охлаждающего воздуха, °С													
	-20		-10		0		+10		+20		+30		+40	
	М, Д	ДЦ	М, Д	ДЦ	М, Д	ДЦ	М, Д	ДЦ	М, Д	ДЦ	М, Д	ДЦ	М, Д	ДЦ
0,5	2,0	1,9	2,0	1,8	2,0	1,8	2,0	1,7	2,0	1,6	2,0	1,5	2,0	1,5
1,0	2,0	1,8	2,0	1,7	2,0	1,7	2,0	1,6	2,0	1,5	1,9	1,5	1,7	1,4
2,0	2,0	1,7	2,0	1,6	1,9	1,6	1,8	1,5	1,7	1,4	1,6	1,4	1,4	1,3
4,0	1,8	1,6	1,7	1,5	1,7	1,5	1,6	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,2	1,3
6,0	1,7	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2
8,0	1,7	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,3	1,4	1,2	1,3	1,1	1,2
12,0	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,3	1,4	1,2	1,3	1,1	1,2
24,0	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,3	1,4	1,2	1,3	1,1	1,2

\* Трансформаторы классов напряжения до 110 кВ включительно.

Следует отметить, что уже в 1986 г. в связи с введением ГОСТ 14209–85 [5] был издан технический циркуляр ТЦ 656–86 [7], который предписывал при определении допустимой аварийной перегрузки трансформаторов в системах электроснабжения промышленных предприятий руководствоваться [5] независимо от категории электроприемников. ТЦ 656–86 [7] отменил требования действующих в то время строительных норм СН 174–75 [8], в которых выбор номинальной мощности трансформаторов на промышленных предприятиях осуществлялся в зависимости от категории подключенных электроприемников:

«7.20. Для трансформаторов цеховых подстанций рекомендуется, как правило, принимать следующие коэффициенты загрузки:

- для цехов с преобладающей нагрузкой I категории при двухтрансформаторных подстанциях – 0,65–0,70;
- для цехов с преобладающей нагрузкой II категории при однострансформаторных подстанциях с взаимным резервированием трансформаторов – 0,70–0,80;
- для цехов с преобладающей нагрузкой II категории при возможности использования централизованного резерва трансформаторов и для цехов с нагрузками III категории – 0,90–0,95».

В соответствии с [7] выбор мощности трансформаторов предлагается выполнять следующим образом:

а) расчетную суточную продолжительность аварийной перегрузки трансформаторов принимать соответственно количеству рабочих смен предприятия (цеха): при односменной работе – 4 ч; при двухсменной – 8 ч; при трехсменной – 12–24 ч;

б) допустимые аварийные перегрузки трансформаторов определять с учетом вида установки:

- для трансформаторов, установленных на открытом воздухе, – в зависимости от эквивалентной годовой (или сезонной) температуры охлаждающего воздуха;

- для трансформаторов, установленных в закрытых камерах или в неотопливаемых помещениях (цехах), – при эквивалентной годовой температуре 10 °С;

- для внутрицеховых подстанций, установленных в отопливаемых цехах, – при эквивалентной годовой температуре 20 °С.

В настоящее время существуют и другие документы [9, 10], предлагающие осуществлять выбор номинальной мощности силовых масляных трансформаторов способами, отличными от классического метода. Однако анализ указанных документов выявил, что их требования основаны на [5]. Из приведенного описания следует, что ГОСТ 14209–85 является основным документом, нормирующим нагрузочную способность трансформаторов, требованиями которого следует руководствоваться при выборе номинальной мощности силовых масляных трансформаторов.

Анализ требований [5] показал, что в качестве наиболее точного и универсального метода определения допустимых перегрузок трансформаторов рекомендуется использовать метод расчета тепловых переходных процессов. Необходимость в выполнении расчетов тепловых переходных процессов обусловлена снижением прочности изоляции масляного трансформатора при повышении температуры его элементов. Снижение электрической прочности вызвано выделением пузырьков газа в местах с высокой электростатической напряженностью, т. е. в обмотках или соединениях трансформатора. В бумажной изоляции трансформаторов пузырьки газа начинают выделяться при повышении температуры. Чем выше температура обмоток или масла трансформатора, тем больше вероятность его отказа.

Таким образом, требования о допустимости любого режима работы трансформатора наиболее точно могут быть выражены в виде допустимых температур характерных критических точек в трансформаторе. Коэффициенты допустимой перегрузки, используемые в упомянутых выше методах, являются лишь косвенно определенными величинами.

В ГОСТ 14209–85 [5] регламентируются:

- допустимое значение температуры масла в верхних слоях трансформатора;

- допустимое значение температуры наиболее нагретой точки обмотки трансформатора.

Допустимые значения температуры масла в верхних слоях трансформаторов согласно [5]:

- для систематических нагрузок – 95 °С;
- для аварийных перегрузок – 115 °С.

Допустимые значения температуры наиболее нагретой точки обмотки согласно [5]:

- для систематических нагрузок – 140 °С;
  - для аварийных перегрузок трансформаторов классов напряжения 110 кВ и менее – 160 °С; классов напряжения более 110 кВ – 140 °С.
- Температуры верхних слоев масла и наиболее нагретой точки обмотки трансформатора зависят от параметров трансформатора, его системы охлаждения и температуры охлаждающей среды, а также графика электрической нагрузки. Определение допустимых нагрузок трансформаторов

на основе тепловых переходных процессов в нормативных документах пятидесятилетней давности упрощалось из-за необходимости выполнения трудоемких дифференциальных вычислений. В настоящее время проектирование электросетевых объектов осуществляется с использованием компьютеров, поэтому трудоемкость дифференциальных вычислений не может быть основанием для выполнения грубых расчетов, особенно ввиду высокой стоимости трансформаторов по отношению к общей стоимости подстанции.

В качестве примера на рис. 1 показаны результаты расчета тепловых переходных процессов в трансформаторе при условиях, соответствующих классическому методу. Результаты расчета представлены в виде графиков изменения во времени температуры критических точек в трансформаторе. Расчет выполнен для трансформатора напряжением 110 кВ с системой охлаждения М (естественное охлаждение) или Д (охлаждение вентиляторами) [5]. В расчетах приняты следующие условия классического метода:

- продолжительность перегрузки 6 ч;
- температура окружающей среды 20 °С;
- форма суточного графика электрических нагрузок – двухступенчатая: основная нагрузка 80 %, во время перегрузки 140 %.

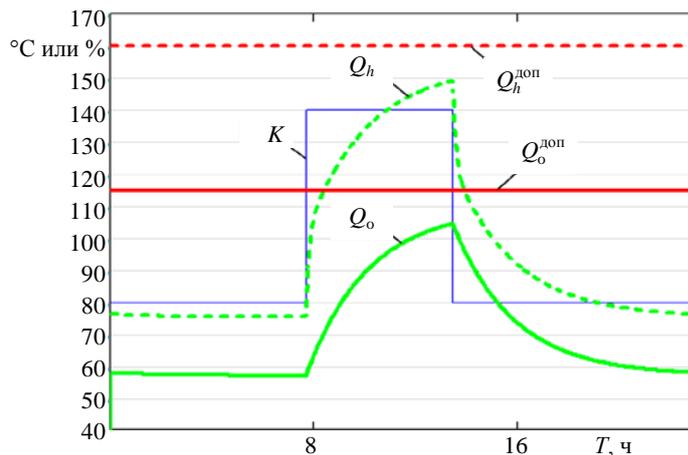


Рис. 1. График изменения температуры критических точек в трансформаторе напряжением 110 кВ с системой охлаждения М или Д: K – коэффициент нагрузки трансформатора;  $Q_o$  – температура верхних слоев масла;  $Q_h$  – температура наиболее нагретой точки обмотки

На рис. 1 показаны:  $K = f(T)$  – график изменения коэффициента нагрузки трансформатора;  $Q_o = f(T)$  – то же температуры верхних слоев масла в баке трансформатора. При допустимой нагрузке трансформатора температура данной критической точки не должна превысить допустимое значение  $Q_o^{\text{доп}} = 115$  °С [5];  $Q_h = f(T)$  – то же температуры наиболее нагретой точки обмотки трансформатора. При допустимой нагрузке трансформатора температура данной критической точки не должна превысить допустимое значение  $Q_h^{\text{доп}} = 160$  °С [5].

Анализ результатов расчета тепловых переходных процессов в трансформаторе, приведенных на рис. 1, показал, что трансформатор может выдержать большее значение аварийной нагрузки, так как наибольшее значение температуры критических точек ( $Q_o$ ,  $Q_h$ ) ниже соответствующих допустимых значений ( $Q_o^{доп}$ ,  $Q_h^{доп}$ ) на 10 °С.

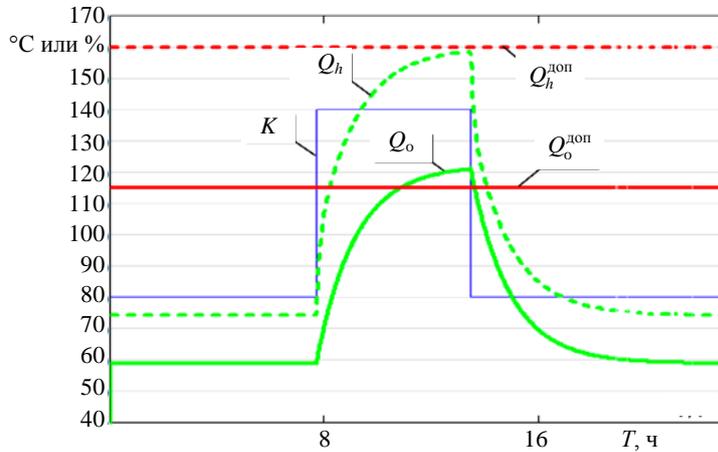


Рис. 2. График изменения температуры критических точек в трансформаторе напряжением 110 кВ с системой охлаждения Ц или ДЦ (обозначения те же, что на рис. 1)

Результаты расчетов тепловых переходных процессов в трансформаторе напряжением 110 кВ с системой охлаждения Ц (охлаждение с принудительной циркуляцией масла) или ДЦ (охлаждение вентиляторами с принудительной циркуляцией масла) приведены на рис. 2. В расчетах, как и ранее, приняты условия классического метода. В соответствии с приведенными на рис. 2 результатами расчета нагрузка для трансформатора недопустима, так как наибольшее значение температуры верхних слоев масла ( $Q_o$ ) превышает допустимое значение  $Q_o^{доп} = 115$  °С [5]. В общем случае при выполнении расчетов тепловых переходных процессов графики нагрузки трансформатора, так же как температура окружающей среды, могут быть произвольными.

Результаты расчетов тепловых переходных процессов в трансформаторе напряжением 110 кВ с системой охлаждения Ц или ДЦ приведены на рис. 3 при следующих условиях:

- форма графика и продолжительность электрических нагрузок произвольная,  $T = 168$  ч;
- температура окружающей среды изменяется от 15 до 30 °С.

График электрических нагрузок (рис. 3) задан в произвольном виде для недельного периода. Результаты расчетов тепловых переходных процессов в трансформаторе приведены для одной недели (168 ч). Первые три дня недели трансформатор работал в нормальном режиме, четыре последующих дня – с аварийной перегрузкой. В соответствии с приведенными на рис. 3 результатами расчета нагрузка для трансформатора допустима, так как наибольшее значение температуры критических точек ( $Q_o$ ,  $Q_h$ ) ниже допустимых значений ( $Q_o^{доп}$ ,  $Q_h^{доп}$ ) [5].

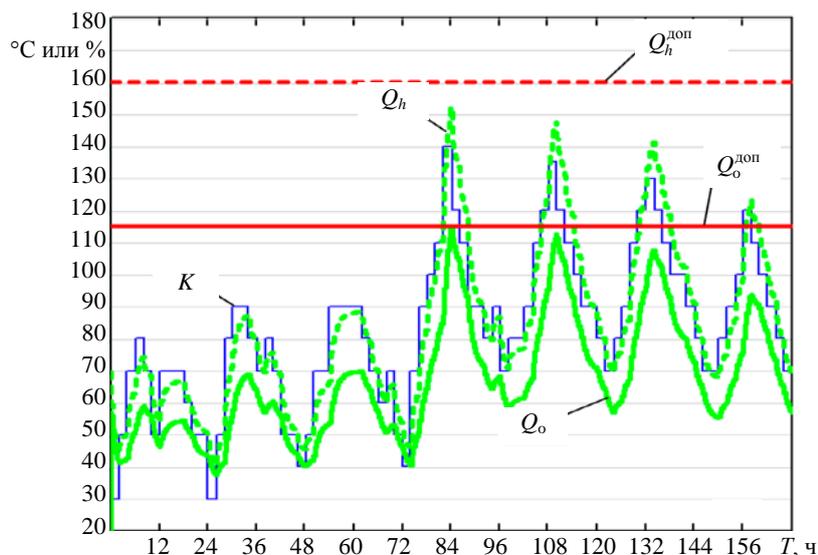


Рис. 3. График изменения температуры критических точек в трансформаторе напряжением 110 кВ с системой охлаждения Ц или ДЦ (обозначения те же, что на рис. 1)

Следует отметить, что во время аварийной перегрузки происходит повышенное сокращение ресурса трансформатора, что приводит к уменьшению срока службы. Основное сокращение ресурса трансформатора обусловлено повышенным тепловым износом изоляции. ГОСТ 14209–85 [5] предусматривает метод расчета теплового износа изоляции. Это позволяет определить допустимый, с точки зрения нормального срока службы, режим работы трансформатора с периодической перегрузкой или рассчитать последствия аварийной перегрузки.

В заключение следует обратить внимание, что ГОСТ 14209–85 нормирует нагрузочную способность силовых масляных трансформаторов мощностью до 100 МВ·А, если иное не оговорено в стандартах или технических условиях на конкретные группы или типы трансформаторов [11]. Для трансформаторов мощностью более 100 МВ·А требования к нагрузочной способности должны быть приведены в инструкции по эксплуатации [11]. Однако метод расчета нагрузочной способности трансформаторов на основе тепловых переходных процессов является более универсальным и при наличии достаточного объема исходных данных может быть применим для силовых трансформаторов любой мощности, что и предусмотрено [12].

## ВЫВОДЫ

1. Выбор номинальной мощности силовых масляных трансформаторов следует выполнять в соответствии с требованиями нормативных документов, регламентирующих их нагрузочную способность. В настоящее время ГОСТ 14209–85 является основным документом, нормирующим нагрузочную способность трансформаторов.

2. В качестве наиболее точного и универсального метода определения допустимых нагрузок трансформатора следует использовать расчет тепло-

вых переходных процессов в нем. Требования о допустимости любого режима работы трансформатора наиболее точно могут быть выражены в виде допустимых температур критических точек. Коэффициенты допустимой перегрузки, используемые в описанных в статье методах, являются лишь косвенно определенными величинами.

3. В настоящее время проектирование электросетевых объектов осуществляется с использованием компьютеров, поэтому трудоемкость дифференциальных вычислений при расчете переходных процессов не может быть основанием для выполнения грубых расчетов, особенно ввиду высокой стоимости трансформаторов по отношению к общей стоимости подстанции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / В. В. Ершевич [и др.]; под ред. С. С. Рокотьяна и И. М. Шапиро. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 352 с.
2. Поспелов, Г. Е. Электрические системы и сети: учеб. / Г. Е. Поспелов, В. Т. Федин, П. В. Лычев. – Минск: Технопринт, 2004. – 720 с.
3. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей: СТП 34.20.501. – Введ. 20.02.1989. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 288 с.
4. Трансформаторы (и автотрансформаторы) силовые масляные. Нагрузочная способность: ГОСТ 14209–69. – М.: Госстандарт СССР, 1971. – 39 с.
5. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки: ГОСТ 14209–85. – Взамен ГОСТ 14209–69. – Введ. 01.07.1985. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 30 с.
6. Инструкция по эксплуатации трансформаторов в Белорусской энергосистеме: СТП 09110.46.500–05. – Введ. 03.03.2006. – Минск: Белэнерго, 2006. – 80 с.
7. Выбор мощности масляных трансформаторов по их допустимой аварийной перегрузке // Технический циркуляр ВНИПИ «Тяжпромэлектропроект» № 351–86 от 27.01.1986. – М., 1986. – 1 с.
8. Инструкция по проектированию электроснабжения промышленных предприятий: СН 174–75. – Взамен СН 174–67. – Введ. 01.10.1976. – М.: Стройиздат, 1976. – 57 с.
9. Нормативы выбора мощности силовых трансформаторов. 8080тм-т1. – М.: Энергосетьпроект, 1989. – 7 с.
10. Методические указания по выбору мощности силовых трансформаторов 10/0,4 кВ на подстанциях сельскохозяйственного назначения с учетом климатических условий Республики Беларусь. – Минск: Белэнергосетьпроект, 1994. – 17 с.
11. Трансформаторы силовые. Общие технические условия: ГОСТ 11677–85. – Взамен ГОСТ 11677–75. – Введ. 01.07.1986. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 58 с.
12. Трансформаторы силовые. – Ч. 7: Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов: BS IEC 60076-7:2005. – Введ. 31.12.2010. – Женева: МЭК, 2005. – 62 с.

#### REFERENCES

1. Ershovich, V. V., Zeiliger, A. N., Illarionov, G. A., Rudyk, L. Ia., Faibisovich, D. L., Frishberg, R. M., Khabachev, L. D., Shapiro, I. M., & Rokotian, S. S. (1985) *Handbook of Electric Power Systems Design*. 3<sup>rd</sup> ed. Moscow, Energoatomizdat. 352 p. (in Russian).
2. Pospelov, G. E., Fedin, V. T., & Lychev, P. V. (2004) *Electrical Systems and Networks*. Minsk, Tehnoprnt. 720 p. (in Russian).
3. Factory Standard 34.20.501. Rules of Technical Operation of Power Plants and Networks. Moscow, Energoatomizdat, 1989. 288 p. (in Russian).
4. State Standard 14209–69. Oil-Immersed Power Transformers (and Autotransformers). Load conditions. Moscow, USSR State Committee on Standards, 1971. 39 p. (in Russian).
5. State Standard 14209–85. General-Purpose Oil-Immersed Power Transformers. Permissible Loads. Moscow, Publishing Standards, 1985. 30 p. (in Russian).

6. F a c t o r y Standard 09110.46.500–05. Transformers Operating Instructions in the Belarusian Energy System. Minsk, Belenergo, 2006. 80 p. (in Russian).
7. T h e C h o i c e Oil-Immersed Power Transformers in Their Allowable Emergency Overload. *Technical Circular VNIPI “Tyazhpromelektroproekt” No 351–86 on 20.01.1986*. Moscow, 1986. 1 p. (in Russian).
8. B u i l d i n g Standards 174–75. Instructions for Designing Industrial Power. Moscow, State Committee USSR Council of Ministers for Construction, Stroyizdat, 1976. 57 p. (in Russian).
9. F a c t o r y Standard 8080ТМ-Т1. Standards of Deciding the Power Transformers. Moscow, Energosetproect, 1989. 7 p. (in Russian).
10. *Methodological Guidelines for the Selection of the Power Transformers Rated Power 10/0,4 kV Substations for Agricultural Purposes, Taking Into Account the Climatic Conditions of Belarus*. Minsk, Belenergosetproect, 1994. 17 p. (in Russian).
11. S t a t e Standard 11677–85. Power Transformers. General Specifications. Moscow, USSR State Committee on Standards, 1990. 58 p. (in Russian).
12. I n t e r n a t i o n a l Standard 60076-7. Power Transformers – Part 7: Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformers. IEC 60076-7:2005 (English). Geneva, International Electrotechnical Commission, 2005. 62 p.

Представлена кафедрой  
электрических систем

Поступила 11.11.2014

УДК 621.316

## **ПРИМЕНЕНИЕ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ В УСТАНОВКАХ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ СИЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ НА ТЕРМИЧЕСКУЮ И ДИНАМИЧЕСКУЮ СТОЙКОСТЬ**

**Асп. ОЛЕКСЮК И. В.**

*Белорусский национальный технический университет*

E-mail: [ilya.oleks@gmail.com](mailto:ilya.oleks@gmail.com)

Токопроводящие жилы силовых электрических кабелей должны быть стойкими к воздействию токов короткого замыкания, значения которых зависят от материала жилы, площади ее поперечного сечения, свойств изоляции кабеля, температуры окружающей среды, а также времени протекания тока короткого замыкания (1 и 3–4 с при испытаниях на динамическую и термическую стойкость). Установки для испытания токами короткого замыкания кабелей напряжением 10 кВ с алюминиевыми жилами должны обеспечивать ток динамической стойкости 56,82 кА, ток термической стойкости 11,16 кА. Такие значения испытательных токов наилучшим образом обеспечивают конденсаторы. Использование традиционных конденсаторных установок повлечет большие затраты на строительство и эксплуатацию отдельного помещения. В качестве источника питания испытательных установок, где требуются токи значениями десятки килоампер, целесообразно использовать конденсаторы с двойным электрическим слоем – суперконденсаторы.

При проведении испытаний токами короткого замыкания напряжение на изоляции не стандартизировано, поэтому силовые электрические кабели с изоляцией на 10 кВ токами термической и динамической стойкости не запрещено испытывать при напряжении менее 10 кВ. График изменения напряжения суперконденсатора во времени состоит из двух участков: емкостного и резистивного. Емкостный участок представляет собой изменение напряжения вследствие изменения энергии в суперконденсаторе.