ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 54419— 2011 (МЭК 60076-12:2008)

ТРАНСФОРМАТОРЫ СИЛОВЫЕ

Часть 12

Руководство по нагрузке сухого трансформатора

IEC 60076-12:2008
Power transformers — Part 12:
Loading guide for dry-type power transformers
(MOD)

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2012

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

Цели и принципы стандартизации в Российской Федерации установлены Федеральным законом от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании», а правила применения национальных стандартов Российской Федерации — ГОСТ Р 1.0—2004 «Стандартизация в Российской Федерации. Основные положения»

Сведения о стандарте

1 ПОДГОТОВЛЕН Некоммерческим партнерством «Инновации в электроэнергетике» (НП «ИНВЭЛ») на основе собственного аутентичного перевода на русский язык стандарта, указанного в пункте 4; Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт стандартизации и сертификации в машиностроении» (ФГУП «ВНИИНМАШ»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 39 «Энергосбережение, энергетическая эффективность, энергоменеджмент»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 сентября 2011 г. № 344-ст

4 Настоящий стандарт является модифицированным (MOD) по отношению к международному стандарту МЭК 60076-12:2008 «Силовые трансформаторы. Часть 12. Руководство по нагрузке сухого трансформатора» (IEC 60076-12:2008 «Power transformers — Part 12: Loading guide for dry-type power transformers»).

При применении настоящего стандарта рекомендуется использовать вместо ссылочных международных стандартов соответствующие им национальные стандарты Российской Федерации и межгосударственные стандарты

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодно издаваемом информационном указателе «Национальные стандарты», а текст изменений и поправок — в ежемесячно издаваемых информационных указателях «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ежемесячно издаваемом информационном указателе «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет

© Стандартинформ, 2012

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины и определения 2
4 Перегрузки, превышающие данные технического паспорта и/или технических условий 2
5 Термическое старение и срок службы изоляции трансформатора 3
6 Ограничения 10
Приложение А (справочное) Скорость теплового старения 11
Приложение Б (справочное) Расчеты срока службы на примере расчетов трех режимов нагрузки . . . 14
Приложение В (справочное) Перечень символов 20
Библиография 22

Введение к МЭК 60076-12:2008

Международный стандарт МЭК 60076-12 (английская версия) был подготовлен Техническим комитетом 14 МЭК «Силовые трансформаторы».

Стандарт МЭК 60076-12:2008 отменяет и заменяет стандарт МЭК 60905:1987. В этом первом издании представлена техническая проверка.

Текст стандарта основан на следующих документах:

FDIS	Отчет о голосовании
14/584/FDIS	14/590/RVD

Полную информацию о результатах голосования о принятии стандарта можно найти в отчете о голосовании, указанном в выше приведенной таблице.

Издание было составлено в соответствии с директивой ИСО/МЭК, часть 2.

Список всех стандартов серии МЭК 60076 под общим наименованием *Силовые трансформаторы* приведен на официальном сайте МЭК.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ТРАНСФОРМАТОРЫ СИЛОВЫЕ

Часть 12

Руководство по нагрузке сухого трансформатора

Power transformers. Part 12: Loading guide for dry-type power transformers

Дата введения — 2012—07—01

1 Область применения

Настоящий стандарт:

- предназначен инженерам-технологам как руководство при выборе подходящих значений величин и условий эксплуатации (нагрузок) нового оборудования;
- применяется к силовым трансформаторам сухого типа в рамках стандарта [1];
- является руководством по нагрузке сухих силовых трансформаторов с точки зрения рабочей температуры и термического старения;
- устанавливает:

а) способы определения скорости термического старения и срока службы изоляционной системы трансформаторов в зависимости от рабочей температуры, времени и нагрузки трансформатора.

Примечание — В целях специального использования в трансформаторах ветрового двигателя, электрических печей, сварочных машин и других, изготовитель обязан ознакомиться с соответствующей диаграммой нагрузки.

б) нормы и результаты нагрузок в виде таблиц;

в) рекомендации по ограничению допустимой нагрузки по результатам выполненных расчетов температуры и измерений. Эти рекомендации допускается применять к нагрузкам различных типов (непрерывным нагрузкам, длительным и кратковременным аварийным перегрузкам);

г) понятия процессов теплового старения (приложение А);

- рекомендует математические модели, которые помогут оценить последствия нагрузки в разных условиях, при разных температурах охлаждающей среды и при неустановившемся или циклическом напряжении. Модели предусматривают расчет рабочих температур в трансформаторе, а именно температуру наиболее нагретой части в обмотке. Чтобы установить затраченное время от всего срока службы трансформатора в течение определенного промежутка времени необходимо знать температуру наиболее нагретой точки.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использована ссылка на следующий стандарт:

ГОСТ 16110—82 Трансформаторы силовые. Термины и определения

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодно издаваемому информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по соответствующим ежемесячно издаваемым информационным указателям, опубликованным в текущем году. Если ссылочный стандарта заменен (изменен), то при пользовании настоящим стандартом следует руководствоваться заменяющим (измененным) стандартом. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, применяется в части, не затрагивающей эту ссылку.

Издание официальное

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины и определения в соответствии с ГОСТ 16110, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **длительная аварийная перегрузка:** Перегрузка, возникающая в результате длительного перерыва в работе некоторых элементов оборудования, которые не могут быть повторно подключены, пока трансформатор не наберет новую и более высокую устойчивую температуру.

3.2 **кратковременная аварийная перегрузка:** Значительная перегрузка вследствие одного или более событий, которые серьезно нарушают работу электрического оборудования, вызывая нагрузку, при которой наиболее нагретая точка обмотки достигает опасного уровня температуры, и возможно временное снижение электрической прочности.

3.3 **наиболее нагретая точка:** Точка изоляции обмотки трансформатора, имеющая максимальную температуру.

3.4 **относительная скорость термического старения:** Скорость уменьшения или возрастания термического старения изоляции трансформатора для заданной температуры наиболее нагретой точки, относительно скорости термического старения, при исходной температуре наиболее нагретой точки.

4 Перегрузки, превышающие данные технического паспорта и/или технических условий

4.1 Общие положения

Номинальный термический срок службы изоляции — основа для работы трансформатора в непрерывном режиме при заданных условиях эксплуатации и заданных температурах окружающей среды. Перегрузки и эксплуатация трансформатора при температурах окружающей среды, превышающих данные технического паспорта, заданных и/или установленных техническими условиями, влекут за собой увеличение степени риска отказов и ускоренное тепловое старение изоляции. Задача настоящего стандарта — определить риски и показать, как выполнить нагрузку трансформатора с превышением номинальных значений, не выходя за рамки допустимых параметров.

4.2 Общие последствия

Последствиями перегрузки трансформатора свыше номинальных параметров могут являться:

- рост температуры до недопустимого уровня в обмотках, концевой муфте, электропроводке, переключателях ответвлений обмоток и изоляционном материале;
- рост температуры изоляционного материала до недопустимого уровня из-за невосприимчивости или недостаточной восприимчивости к перегрузкам системы охлаждения трансформатора;
- риск отказа в период приработки, связанный с повышением тока и воздействием высокой температуры. Данный риск может носить краткосрочный характер или накапливаться в течение многих лет от общего эффекта теплового старения изоляционного материала трансформатора.

Примечание — Другой причиной неисправной работы трансформатора при перегрузке может стать резкий перепад напряжения в трансформаторе.

4.3 Последствия и риски кратковременной аварийной перегрузки

За пределами допустимых ограничений главными рисками при кратковременной аварийной перегрузке могут стать:

- недопустимый уровень предельного механического перенапряжения из-за увеличенной температуры. Последствия: трещины изоляционного материала трансформатора и герметизирующей эпоксидной смолы;
- механическое повреждение обмотки при значениях тока короткого замыкания и/или мгновенных значений токов перегрузки выше значения номинального тока;
- механическое повреждение обмотки при наличии тока короткого замыкания и прерывистого тока, если окружающая температура выше расчетной;
- ухудшение механических свойств и, как следствие, снижение силы тока короткого замыкания, при высокой заданной температуре;
- снижение диэлектрической прочности изоляции из-за повышенной температуры.

Максимальное значение тока перегрузки ограничено 50 % номинального тока.

При условиях перегрузки свыше 50 % необходимо согласование с изготовителем для оценки последствий такой перегрузки. Длительность такой перегрузки должна быть максимально короткой.

4.4 Результаты длительной аварийной перегрузки

В результате длительной аварийной перегрузки трансформатора и воздействия высоких температур происходит:

- общее термическое старение изоляции, особенно если устройство подключено к цепи короткого замыкания;
- быстрый износ изоляционных материалов и других деталей конструкции и проводников при высоких температурах.

Общие правила расчета скорости теплового старения и определение расчетного срока службы трансформатора основаны на анализе результатов перегрузки трансформатора.

5 Термическое старение и срок службы изоляции трансформатора

5.1 Общие положения

Опыт подтверждает, что срок службы трансформатора составляет не более 20 лет. Нельзя сказать точнее, поскольку даже у трансформаторов с одинаковыми эксплуатационными характеристиками срок службы может быть различным. Работа трансформатора со 100 %-ным номинальным током, как правило, исключение. Повлиять на срок службы трансформатора могут и другие тепловые факторы, такие как недостаточное охлаждение, чрезмерные гармоники и/или неправильные условия эксплуатации.

При потерях в трансформаторе тепло поступает в систему изоляции и начинается химический процесс, который изменяет молекулярную структуру изоляционных материалов. Чем больше тепла поступает в систему, тем выше скорость термического старения изоляции. Это кумулятивный и необратимый процесс, означающий, что материалы не восстанавливают свою первоначальную молекулярную структуру при прекращении подачи тепла и снижении температуры. Термический индекс системы изоляции трансформатора указан в документах изготовителя (технических условиях и/или техническом паспорте). Повреждение системы изоляции вследствие изменений свойств по причине термического старения может стать причиной выхода из строя трансформатора.

По закону Аррениуса скорость термического старения изменяется в зависимости от температуры (см. приложение А). Согласно закону Аррениуса обе постоянные можно вычислить из уравнения теплостойкости. В случае отсутствия результатов испытаний в руководстве указаны заданные параметры, которые рассчитаны из следующих допущений:

- повышение температуры на 6 °С удваивает скорость термического старения. 6 °С — заданный параметр для всей обмотки, связанный с параметром специальных материалов в обмотке;
- при проверке на теплостойкость всей системы электрической изоляции должно быть использовано другое значение величины, которое удвоит скорость термического старения;
- причиной отключения трансформатора могут стать повреждения в изоляции трансформатора.

5.2 Срок службы

Номинальный срок службы трансформатора L, при постоянной термодинамической температуре T наиболее нагретой точки, °С, может быть определен по формуле

$$L = a \cdot e^{\frac{b}{T}}, \quad (1)$$

проще определять по формуле

$$L = a \cdot \exp\left(\frac{b}{T}\right). \quad (2)$$

В формулах может быть использована любая единица времени, в данном случае это час. Значение постоянной a, ч, приведено в таблице 1 для разных температур системы изоляции.

Примечания

1 Расчетный срок службы трансформатора нельзя с точностью рассчитать с помощью уравнения. Способность трансформатора выдерживать высокие токи перегрузки, обусловленные токами короткого замыкания в энергосистеме и перенапряжениями, безусловно, снижается по сравнению с новым трансформатором. Продлить срок службы трансформатора можно принятием мер предосторожности и установлением защиты от коротких замыканий и перенапряжений.

2 Для вычисления коэффициентов *a* и *b* при номинальной температуре наиболее нагретой точки обмотки используются следующие уравнения:

$$\ln(180000) = \frac{b}{\theta_{HS,r} + 6} + \ln(a), \tag{3}$$

$$\ln(90000) = \frac{b}{\theta_{HS,r} + 6} + \ln(a), \tag{4}$$

где $\theta_{HS,\,r}$ — номинальная температура наиболее нагретой точки обмотки.

3 Если температура наиболее нагретой точки ниже номинального параметра, т.е. менее 6 °С, то номинальный срок службы трансформатора сокращается вполовину. Фактический срок службы трансформаторов составляет, как правило, около 20 лет. Таким образом, для таблицы 1 постоянные *a* и *b* были рассчитаны путем деления пополам 180 000 ч на постоянную времени 6 К.

Таблица 1 — Постоянные для уравнения расчета срока службы трансформатора

Температура изоляционной системы (класс изоляции), °С	Постоянные уравнения Аррениуса		Номинальная температура наиболее нагретой точки обмотки $\theta_{HS,\,r}$, °С
	a, час	*b*, К	
105 (класс A)	$3{,}10 \cdot 10^{-14}$	15 900	95
120 (класс E)	$5{,}48 \cdot 10^{-15}$	17 212	110
130 (класс B)	$1{,}72 \cdot 10^{-15}$	18 115	120
155 (класс F)	$9{,}60 \cdot 10^{-17}$	20 475	145
180 (класс H)	$5{,}35 \cdot 10^{-18}$	22 979	170
200	$5{,}31 \cdot 10^{-19}$	25 086	190
220	$5{,}26 \cdot 10^{-20}$	27 285	210

5.3 Зависимость постоянной непрерывной нагрузки и температуры

Постоянная термодинамической температуры *T* наиболее нагретой точки обмотки, °С, имеет вид:

$$T = 273 + \theta_a + \Delta\theta_{HSn}, \tag{5}$$

где θ_a — температура окружающей среды, °С;

$\Delta\theta_{HSn}$ — разница температур наиболее нагретой точки обмотки и температуры окружающей среды для заданной нагрузки, °С.

Заметим, что температура окружающей среды не может быть независимой от нагрузки, но может быть функцией ее загрузки и определяется выражением:

$$\theta_a = f(I), \tag{6}$$

где I — текущий ток нагрузки, А.

Зависимость температуры окружающей среды от нагрузки может изменяться под влиянием климатических условий. Знание такой зависимости климатических условий для конкретной климатической зоны необходимо для расчета скорости термического старения и определения срока службы трансформатора. Коэффициент корреляции может быть рассчитан для конкретного местоположения трансформатора. Если таких данных нет, то значения скорости термического старения и срока службы можно получить альтернативным путем, а именно проведя расчеты для различных значений температуры окружающей среды, например в пределах от 10 °С до 40 °С.

Формулы настоящего стандарта учитывают потери на вихревые токи и омические потери обмоток трансформатора. Результаты испытаний показывают, что расчетные (теоретические) потери выше реальных (полученных при испытаниях). При наличии гармоник во время перегрузки потери на вихревые токи увеличиваются и возможно потребуются дополнительные расчеты в соответствии с приложением А настоящего стандарта [2].

5.4 Скорость термического старения

На практике номинальный срок службы трансформатора составляет около 180 000 ч. Для расчета скорости термического старения k, выраженной как расход времени всего срока службы за час времени работы при температуре T, °С, в формуле (7) параметр 180 000 ч использован как заданная величина

$$k = 180000 \cdot a^{-1} \cdot \exp\left(\frac{-b}{T}\right). \quad (7)$$

Относительная скорость термического старения k_r при устойчивой температуре T наиболее нагретой точки, °С, выраженная в процентах скорости термического старения равна 180 000 ч срока службы. Скорость термического старения определяется по формуле

$$k_r = 100 \cdot t \cdot a^{-1} \cdot \exp\left(\frac{-b}{T}\right), \quad (8)$$

где значения параметров a и b взяты из таблицы 1.

5.5 Расчетный срок службы трансформатора

Расчетный срок службы трансформатора L_c, ч, при заданной устойчивой температуре T наиболее нагретой точки в определенный период времени t, ч, можно рассчитать по формуле

$$L_c = 180000 \cdot t \cdot a^{-1} \cdot \exp\left(\frac{-b}{T}\right), \quad (9)$$

где значения параметров a и b взяты из таблицы 1.

5.6 Температура наиболее нагретой точки в установившемся режиме

Для большинства эксплуатируемых трансформаторов точная температура наиболее нагретой точки обмотки неизвестна, но ее можно вычислить.

Правила вычисления температуры наиболее нагретой точки:

θ_{HS} — определенная путем расчета и/или испытания температура наиболее нагретой точки, °С, для номинальных условий (номинальные ток, температура окружающей среды, напряжение, частота).

Примечание — Не существует стандартных методов испытаний для определения температуры наиболее нагретой точки. Если у изготовителя есть значения других параметров, он вполне может использовать их для расчета срока службы трансформатора.

5.7 Предполагаемый показатель наиболее нагретой точки

Для дальнейших расчетов предполагаемый показатель наиболее нагретой точки Z = 1,25:

$$\Delta\theta_{HS,r} = Z \cdot \Delta\theta_{Wr}, \quad (10)$$

где $\Delta\theta_{HS,\,r}$ — рост температуры наиболее нагретой точки, °С;

$\Delta\theta_{Wr}$ — средний рост температуры обмотки при номинальной нагрузке и температуре окружающей среды, °С.

5.8 Рост температуры наиболее нагретой точки при изменениях условий окружающей температуры и нагрузки

Температура наиболее нагретой точки — это необходимый параметр для определения расчетного срока службы трансформатора. Значение роста температуры для каждого из заданных положений условий нагрузки $\Delta\theta_{HSn}$ и температуры окружающей среды определяется по формуле

$$\Delta\theta_{HSn} = Z \cdot \Delta\theta_{Wr} \cdot I_n^q, \quad (11)$$

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.

Предпочтительно использовать результаты испытаний для параметра $\Delta\theta_{Wr}$ с целью уменьшения погрешности значения коэффициента Z и числа q. Обычно коэффициент Z и число q имеют разные допустимые значения в зависимости от типа трансформатора и уровня рабочего тока нагрузки.

Примечание — В некоторых типах строения обмотки определить значение $\Delta\theta_{Wr}$ можно только на образце трансформатора.

5.9 Уравнения нагрузки

5.9.1 Продолжительный режим перегрузки трансформатора

Температура наиболее нагретой точки $\Delta\theta_{HS}$, выраженная функцией нагрузки в установившемся режиме, рассчитывается по формуле

$$\theta_{HS} = \theta_a + \Delta\theta_{HS}. \quad (12)$$

Для систем с естественным воздушным охлаждением используют формулу

$$\Delta\theta_{HS} = \Delta\theta_{HS,r} [I]^{2m}, \quad (13)$$

где I — исходный коэффициент загрузки (соотношение между током нагрузки и номинальным током).

Для систем с принудительным охлаждением используют уравнение

$$\Delta\theta_{HS} = \Delta\theta_{HS,r} \left[I^2 C_T \right]^x, \quad (14)$$

где $\Delta\theta_{HS}$ — изменение температуры наиболее нагретой точки на одну единицу нагрузки, °С;

C_T — температурная поправка сопротивления при изменении температуры, определяемая по формуле

$$C_T = \frac{T_k + \theta_{HS}}{T_k + \theta_{HS,r}}, \quad (15)$$

где $\theta_{HS,r}$ — номинальная или заданная температура наиболее нагретой точки на единицу нагрузки, °С.

Примечание — Значения номинальной или заданной температуры для режима работы с естественным воздушным охлаждением для применения в формуле (13) могут отличаться от значений для режима работы с принудительным охлаждением для применения в формуле (14).

I — коэффициент удельной нагрузки (соотношение между током нагрузки и номинальным током);

m — эмпирическая константа, равная 0,8;

Примечание — Значение m = 0,8 применимо до получения результатов испытаний.

θ_a — температура окружающей среды, °С;

θ_{HS} — температура наиболее нагретой точки при нагрузке I, °С;

T_k — константа температуры для алюминиевого проводника — 225К, для медного — 235К;

x = 1 — эмпирическая константа, используемая при расчете принудительного охлаждения.

Примечание — Значение эмпирической константы x = 1 применимо до получения результатов испытаний.

Испытания показали, что вышеприведенные уравнения должны представить стабильные прогнозы температуры наиболее нагретой точки.

Показатель степени m = 0,8 для режима работы с естественным воздушным охлаждением систем и показатель степени x = 1 для режима работы с принудительным охлаждением выводит корреляцию теплообмена для естественного и принудительного теплообмена. Данные испытаний указывают на то, что зависимость температуры от сопротивления (см. формулу(15)) требуется для прогнозирования роста температуры наиболее нагретой точки при работе с отводом тепла системой принудительного охлаждения.

Формулы (13) и (14) не учитывают потери на вихревые токи в обмотках, которые обратно пропорциональны температуре. Формулы дают стабильный результат, так как потери на вихревые токи при отсутствии гармоник низкие.

Повторно выполняя вычисления по формулам (13) и (14), используя предложенные показатели степеней и учитывая изменение сопротивления при снижении температуры системой принудительного охлаждения, можно получить стабильные результаты расчета роста температуры наиболее нагретой точки, даже если не учитываются потери на вихревые токи. Если присутствуют гармонические составляющие токов перегрузки, то потери на вихревые токи увеличатся и согласно приложению А стандарта [2] потребуется дополнительное изучение проблемы.

5.9.2 Кратковременная перегрузка трансформатора

Рост температуры при кратковременной перегрузке определяют по формуле

$$\Delta\theta_t = \left(\Delta\theta_U - \Delta\theta_i\right)\left[1 - \exp^{\frac{-t}{\tau}}\right] + \Delta\theta_i, \tag{16}$$

$$\theta_{HS} = \Delta\theta_t + \theta_a, \tag{17}$$

где $\Delta\theta_i$ — исходное изменение температуры наиболее нагретой точки при предварительной нагрузке, °С;

$\Delta\theta_t$ — изменение температуры наиболее нагретой точки за время t после изменения режима нагрузки, °С;

$\Delta\theta_U$ — конечное изменение температуры наиболее нагретой точки, если значение перегрузки I_u осталось ниже устойчивого состояния изменения температуры наиболее нагретой точки, °С;

t — время, мин;

τ — постоянная времени для трансформатора при заданной нагрузке, мин;

θ_{HS} — температура наиболее нагретой точки, °С;

θ_a — температура окружающей среды, °С.

5.10 Определение постоянной времени обмотки

5.10.1 Общие положения

Принцип постоянной времени трансформатора основывается на предположении, что всякий источник тепла подает тепло в теплоотвод и что рост температуры теплоотвода является экспоненциальной функцией подводимой теплоты. Постоянная времени — время, за которое происходит повышение температуры на 63,2 % окружающей температуры после ступенчатого изменения нагрузки. Обычно стабилизация температуры происходит в течение пяти постоянных времени. Расчет температуры наиболее нагретой точки должен быть выполнен как на обмотке низкого напряжения, так и на обмотке высокого напряжения, поскольку опубликованные данные испытаний указывают на то, что постоянные времени могут быть разными. Тепловые классы системы изоляции для этих двух обмоток могут отличаться.

После заключения договора между изготовителем и потребителем путем испытаний необходимо рассчитать или определить постоянную времени.

5.10.2 Метод вычисления постоянной времени

Постоянная времени обмотки при номинальной нагрузке τ_R рассчитывается по формуле

$$\tau_R = \frac{C\left(\Delta\theta_{HS,r} - \theta_e\right)}{P_r}, \quad (18)$$

где C — действующая термическая мощность обмотки, Вт · мин/°С, — величина, равная сумме произведений (15,0 · массу алюминия проводника, кг) и (24,5 · массу эпоксидной смолы и другой межобмоточной изоляции, кг) или равная сумме произведений (6,42 · массу меди проводника, кг) и (24,5 · массу эпоксидной смолы и другой межобмоточной изоляции, кг) и

C — действующая термическая мощность обмотки, Вт · ч/°С, — величина, равная сумме произведений (0,25 · массу алюминия проводника, кг) и (0,408 · массу эпоксидной смолы и других компонентов межобмоточной изоляции, кг) или величина, равная сумме произведений (0,107 · массу меди проводника, кг) и (0,408 · массу эпоксидной смолы и других компонентов межобмоточной изоляции, кг);

P_r — общие потери в обмотке (потери на вихревые токи и сопротивление) в условиях номинальной нагрузки и роста температуры, Вт;

$\Delta\theta_{HS,\,r}$ — изменение температуры наиболее нагретой точки обмотки в условиях номинальной нагрузки, °С;

θ_e — величина, определяющая изменение температуры наиболее нагретой точки обмотки при перегрузке. Данная величина должна быть измерена изготовителем в ходе испытаний и измерений изменения температуры в трансформаторе или быть равной:
5 К — для наружной обмотки;
25 К — для внутренней обмотки (менее 1кВ).

Примечания

1 Приведенные выше значения взяты из испытаний, выполненных изготовителями.

2 В качестве межобмоточной изоляции или эпоксидной смолы могут быть использованы другие материалы. Для таких трансформаторов соответствующее приведенное значение тепла, равное 24,5 Вт · мин/°С и/или на кг (или 0,408 Вт · ч/°С и/или на кг), может быть изменено на значение, указанное изготовителем.

5.10.3 Метод определения постоянной времени

Постоянную времени определяют по показателям теплового сопротивления кривой охлаждения во время термических испытаний.

5.11 Определение постоянной времени обмотки по эмпирической константе

При изменении температуры постоянная времени изменяется по эмпирической константе m.

$$\tau_R = \frac{C\left(\Delta\theta_{HS,r} - \theta_e\right)}{P_r}. \quad (19)$$

Если $m = 1$, то уравнение является верным для нагрузки любого типа и номинальной температуры. Если $m \neq 1$, то постоянная времени для нагрузки любого типа и для любой номинальной температуры как в цикле нагрева, так и в цикле охлаждения имеет вид:

$$\tau = \tau_K \frac{\left(\frac{\Delta\theta_U}{\Delta\theta_{HS,r}}\right) - \left(\frac{\Delta\theta_i}{\Delta\theta_{HS,r}}\right)}{\left(\frac{\Delta\theta_U}{\Delta\theta_{HS,r}}\right)^{\frac{1}{m}} - \left(\frac{\Delta\theta_i}{\Delta\theta_{HS,r}}\right)^{\frac{1}{m}}}. \quad (20)$$

5.12 Расчет допустимой нагрузки

Формулы с (12) по (20) должны использоваться для определения температур наиболее нагретой точки в период цикла нагрузки. Кроме того, их используют для определения значений кратковременной

или непрерывной нагрузки, получая параметры максимальных температур, приведенных в таблице 1, или других предельных значений температур.

Определить значения начального роста температуры наиболее нагретой точки и исходный коэффициент нагрузки можно по формуле (13).

Из таблицы 2 следует выбрать предельную температуру наиболее нагретой точки θ_{HS} для температуры окружающей среды и по формуле (12) определить допустимую температуру наиболее нагретой точки по времени *t*.

Таблица 2 — Максимально допустимая температура наиболее нагретой точки обмотки

Температура системы изоляции (класс изоляции), °С [1]	Максимально допустимая температура наиболее нагретой точки обмотки, °С
105 (класс A)	130
120 (класс E)	145
130 (класс B)	155
155 (класс F)	180
180 (класс H)	205
200	225
220	245

Для определения срока службы трансформатора нельзя использовать температуру наиболее нагретой точки выше максимальной температуры наиболее нагретой точки обмотки, указанной в таблице 2, т. к. состав материала обмотки может видоизменяться. При эксплуатации трансформатора при температурах, приведенных в таблице 2, срок службы трансформатора уменьшается и определяется по формуле

$$\theta_{HS} = \Delta\theta_{HS} + \theta_a, \quad (21)$$

где θ_{HS} — температура наиболее нагретой точки, °С;

$\Delta\theta_{HS}$ — изменение температуры наиболее нагретой точки, °С;

θ_a — температура окружающей среды, °С.

Изменение температуры наиболее нагретой точки $\Delta\theta_t$ за время *t* после изменения режима нагрузки, °С, определяется по формуле

$$\Delta\theta_t = \theta_{HS} - \theta_a. \quad (22)$$

Изменение температуры наиболее нагретой точки, °С, определяется по формуле (16).

Конечное значение изменения температуры наиболее нагретой точки определяется по формуле

$$\Delta\theta_U = \left[\frac{\Delta\theta_t - \Delta\theta_i}{1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)}\right] + \Delta\theta_i. \quad (23)$$

Необходимо определить значение постоянной времени по 5.10 настоящего стандарта, время продолжительности цикла нагрузки *t* и подставить значения в формулу (23). По формуле (13) определить значение перегрузки, отвечающее условию:

$$I_U = \left[\frac{\Delta\theta_U}{\Delta\theta_{HS,r}}\right]^{\frac{1}{2m}}, \quad (24)$$

где I_U — конечный коэффициент загрузки.

Постоянную времени определяют методом итерации.

6 Ограничения

6.1 Ограничения тока и температуры

При нагрузке со значениями параметров, указанных в паспортных данных, не должны быть превышены значения температуры наиболее нагретой точки обмотки, приведенные в таблице 3, кроме того, необходимо учесть конкретные ограничения раздела 4 и 5.12.

Для предотвращения механических повреждений в обмотке значение тока ограничено до $1{,}5I_r$, особенно для коротких временных и повторяющихся циклов. Значения, превышающие $1{,}5I_r$, должны быть согласованы изготовителем и заказчиком и внесены в условия договора (технические требования, технические условия и/или техническое задание) на стадии его заключения. Для всех других типов циклов нагрузки коэффициент тока не должен превышать $1{,}5I_r$.

Таблица 3 — Ограничения тока и температуры

Температура (класс изоляции), °С	Коэффициент максимального тока	Максимальная температура для наиболее нагретой точки, °С
105 (класс A)	1,5	130
120 (класс E)	1,5	145
130 (класс B)	1,5	155
155 (класс F)	1,5	180
180 (класс H)	1,5	205
200	1,5	225
220	1,5	245

Примечания

1 Ограничения по току и температуре необязательно действуют одновременно. Если значение тока не превышает приведенного в таблице, то оно отвечает требованиям ограничения температуры. И наоборот, если значение температуры не превышает значений, указанных в таблице, то оно отвечает требованиям ограничений по току.

2 Значения параметров в таблице 3 указывают на то, что при максимально высокой температуре наиболее нагретой точки срок службы нового трансформатора составляет всего несколько тысяч часов.

6.2 Другие ограничения

6.2.1 Магнитное поле рассеяния в металлических деталях конструкции

Магнитное поле рассеяния увеличивается при повышении тока. Это поле может вызывать избыточный рост температуры в металлических деталях конструкции, которые могут ограничить перегрузку. Значения силы тока нагрузки, температуры наиболее нагретой точки и металлических деталей конструкции, обмотки и выводов для подключения нагрузки не должны превышать указанных в таблице 2. Когда значение температуры наиболее нагретой точки находится выше значения самой высокой температуры, указанной в таблице 2, по тепловому классу изоляции трансформатора свойства системы изоляции ухудшаются на уровень ниже минимально допустимого значения диэлектрической прочности трансформатора.

6.2.2 Вспомогательные устройства

Помимо обмоток, другие детали трансформатора, такие как проходной изолятор, концевые соединения проводов, приборы переключения ответвлений и измерения температуры, разрядники для защиты от атмосферных перенапряжений и электропроводка могут ограничить в 1,5 раза значение номинального тока работы трансформатора.

6.2.3 Трансформаторы в защитном кожухе

Защитный кожух трансформаторов продлевает срок эксплуатации.

Когда трансформатор находится в закрытом помещении, необходимо внести поправки в значение роста номинальной температуры наиболее нагретой точки с учетом защитного корпуса (помещения).

6.2.4 Трансформаторы на открытом воздухе

При возникновении нагрузок выше значений паспортных данных необходимо учитывать, что прямые солнечные лучи могут вызвать чрезмерный рост температуры трансформатора.

Учитывая непредсказуемые погодные условия, нецелесообразно считать ветер за допустимый охладитель трансформатора.

Приложение А
(справочное)

Скорость теплового старения

А.1 Нагрузочная способность трансформатора

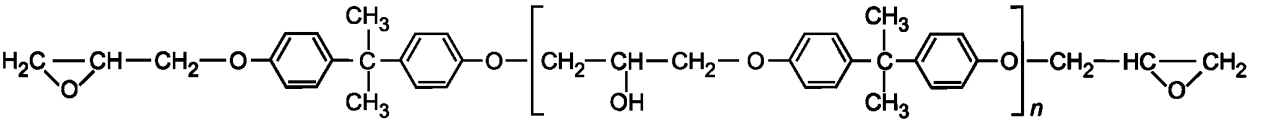
Нагрузочная способность трансформаторов связана со свойствами изоляционных материалов и системой изоляции. Если в масляном трансформаторе главный твердый изоляционный материал это целлюлоза, то в трансформаторах сухого типа используют широкий спектр других изоляционных материалов.

А.2 Молекулярная структура

А.2.1 Общие положения

Главной обобщающей особенностью твердых изоляционных материалов является молекулярная структура, которая может состоять из длинных цепей связанных между собой атомов. Цепи включают в себя ветви, шестиугольные кольца и поперечные связи между цепями.

Пример строения молекулы эпоксидной смолы приведен на рисунке А.1.



$n = 0, 1, 2, 3$

Рисунок А.1 — Молекулярная структура эпоксидной смолы

Молекулы находятся в движении. В твердом изоляционном материале эти движения колебательного характера. Когда при потерях в проводнике обмотки (или других источниках тепла) тепло поступает в изоляционные материалы, в нем происходит преобразование тепловой энергии в кинетическую энергию. С ростом кинетической энергии движение молекул становится быстрее и с большей амплитудой, другими словами, оно становится хаотичным. Возможность, что при столкновении молекулы распадутся на атомы, возрастает. Тип химического процесса, когда в материал поступает тепло, называется эндотермическим процессом.

А.2.2 Окисление

Помимо эндотермического процесса могут возникнуть и другие, такие как окисление.

Интенсивность этого химического процесса зависит от температуры, которая в свою очередь зависит от количества тепла, поступающего в изоляционный материал.

Изоляционные материалы разработаны таким образом, чтобы оптимально выполнять свое назначение при эксплуатации. Изменения в молекулярной структуре материала во время эндотермического процесса оказывают влияния на такие важные свойства материала, как механическую и диэлектрическую прочность, термостойкость и герметизирующее действие. Это обычно приводит к ухудшению работы этих свойств. При таких условиях отклонения в работе других свойств могут не происходить. Понятие старения обычно связывают именно с этим химическим процессом и последующим отклонением в работе свойств материала.

А.2.3 Свойства теплостойкости

А.2.3.1 Тепловой индекс (ТИ) и половинный интервал (ПИ) — два термина, характеризующие свойства теплостойкости изоляционного материала и системы изоляции. ТИ — числовое значение температуры, °С, выведенное из зависимости теплостойкости от времени. По стандартам Международной электротехнической комиссии (МЭК) этот промежуток времени составляет 20 000 ч, но может быть определено и другое время. ПИ — числовое значение температурного интервала, который выражает деление пополам выбранного времени до конечной точки, взятой при температуре, равной ТИ. См. рисунок А.2.

ТИ и ПИ рассчитаны экспериментальным путем в ускоренном испытании при повышенных температурах. Метод основан на истинности уравнения Аррениуса.

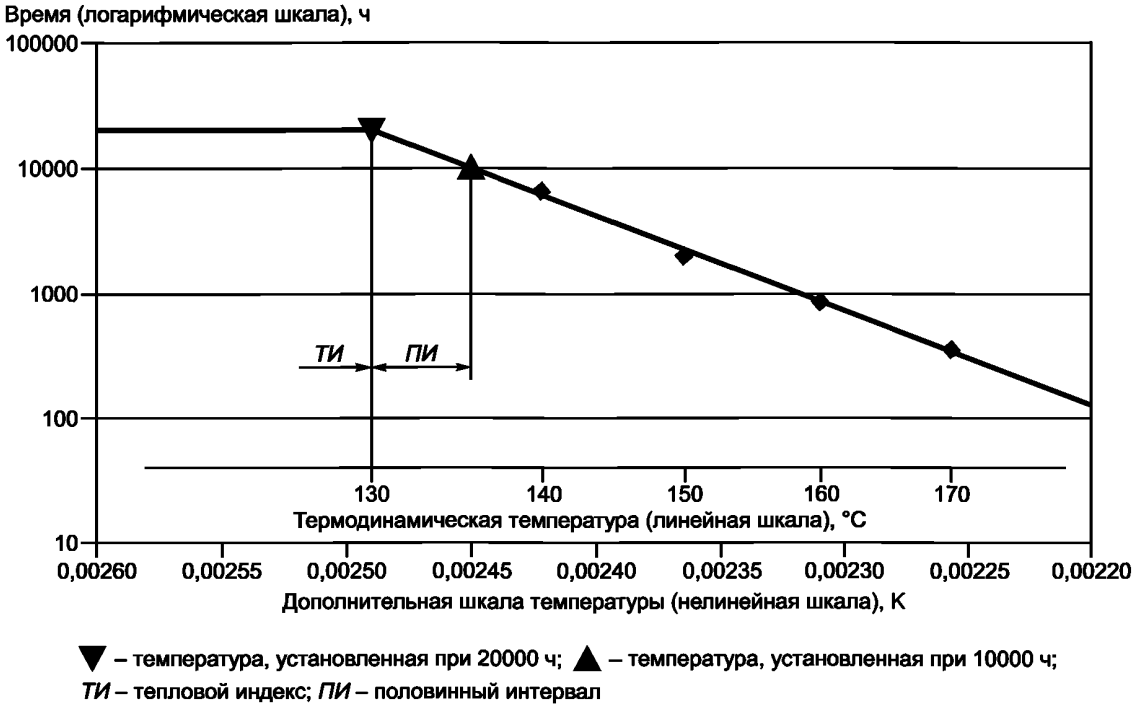


Рисунок А.2 — График теплостойкости

А.2.3.2 Закон Аррениуса

Выдающийся химик и физик Сванте Аррениус (лауреат Нобелевской премии 1903 года по химии) установил общую зависимость между температурой и константой скорости химической реакции, где k — постоянная скорости химической реакции, $с^{-1}$:

$$k = A \cdot e^{\left(\frac{E_a}{R \cdot T}\right)}, \qquad (А.1)$$

A — постоянная Аррениуса, $с^{-1}$;

E_a — энергия активации в конкретном материале, кДж · $моль^{-1}$;

R — универсальная газовая постоянная, равная $8{,}314 \cdot 10^3$, кДж·$моль^{-1} \cdot К^{-1}$;

T — температура, °С;

e — основание натурального логарифма (2,71828...).

Уравнение (А.1) больше известно как закон или уравнение Аррениуса.

$R = 8{,}314 \cdot 10^{-3}$кДж·$моль^{-1} \cdot К^{-1}$. Энергия активации E_a — количество энергии, необходимое для начала реакции в конкретном материале. Значение E_a не изменяется от температуры. Единица измерения E_a — кДж · $моль^{-1}$.

Единица измерения A и k — секунда в минус первой степени ($с^{-1}$), но для удобства могут быть другие единицы времени, например час. Константа скорости химической реакции k показывает, как быстро протекает химическая реакция в одном материале или в сочетании изоляционных материалов.

Уравнение (А.1) может выглядеть

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{A} \cdot e^{\left(\frac{E_a}{R \cdot T}\right)}. \qquad (А.2)$$

Значение $1/k$, с, — затраченное время прохождения химической реакции до определенной стадии.

Уравнение (А.2) может выглядеть

$$h = a \cdot e^{\frac{b}{T}}, \qquad (А.3)$$

где $h = 1/k$;

$a = 1/A$;

$b = /R$.

Для натурального логарифма справедлива простая формула

$$\ln h = \ln a + b \cdot \frac{1}{T}. \qquad (A.4)$$

А.2.3.3 График теплостойкости

Диаграмму, на которой значения ln h и $1/T$ размещены на прямой в декартовой системе координат, называют графиком теплостойкости (на примере рисунка А.2).

Испытание теплостойкости проводят при температурах выше ожидаемой температуры теплового индекса. На рисунке А.2 приведены значения температуры 170, 160, 150 и 140 °С.

Критическое значение исследуемого свойства материала (например, переменное пробивное напряжение) может быть определено как минимальная абсолютная величина (например, кВ/мм) или как исчисляемая в процентах остаточная величина свойства материала до начала испытания. В стандартах МЭК определены критические значения характеристик для некоторых типов материалов, но не для всех. Например, в стандарте [3] есть некоторые рекомендации для числа показателей свойств материала. В остальных случаях определение критических значений параметров материала является предметом согласования между производителем материала и заказчиком.

Критическое значение параметра, равное 50 % остаточной величины, может означать выход из строя изоляции трансформатора, но это не должно восприниматься буквально. Определение критических значений параметров изоляционного материала в стандартах МЭК скорее условное, чем функциональное. Износ материала процесс постепенный, и достижение критического значения параметра не подразумевает резкого разграничения между нормальным режимом эксплуатации трансформатора и выходом из строя. Достижение критического значения параметра означает, что определенное свойство материала ухудшается на некоторый процент относительно первоначального значения. Это означает, что прочность и соответственно эксплуатационная надежность трансформатора снизилась по сравнению с новым трансформатором. Что касается, например, диэлектрических свойств, то трансформатор вполне может хорошо функционировать на протяжении многих лет, если не возникнет серьезных перенапряжений.

Если не возникают высокие токи перегрузки при коротких замыканиях в энергосистеме, то трансформатор может и дальше функционировать, несмотря на ухудшенные свойства материала.

На рисунке А.2 четыре точки показывают время в часах, необходимое для достижения критических значений параметра при четырех разных значениях температур 170, 160, 150 и 140 °С в ходе испытаний на теплостойкость. Линия регрессии соединяет четыре точки и продлена до ординаты точки 20 000 ч. Пересечение — в точке со значением температуры 130 °С.

Следовательно, тепловой индекс для определенного материала составляет 130. Кроме того, по линии регрессии рост установленной температуры на 5 °С приведет в конечную точку материала после 10 000 ч. Половинный интервал будет равен 5.

Поскольку разные свойства материала могут ухудшаться при различных условиях, необходимо определить несколько тепловых индексов или половинных интервалов для одного и того же материала.

Подробное описание процесса испытания приведено в стандартах [3]—[10]. На рисунке А.2 приведен упрощенный принцип, в действительности результат будет представлять дисперсию образцов материала частично из-за действительного изменения материала, а частично из-за неточности измерений.

Подробное описание расчета характеристик теплостойкости, на примере экспериментальных данных, приведено в стандарте [6], включая статистические испытания по проверке истинности уравнения Аррениуса. Материалы, состоящие в основном из неорганических компонентов, могут вызывать значительные отклонения в уравнении Аррениуса.

В руководстве по нагрузке трансформатора за основу взято уравнение Аррениуса.

Температура внутри обмотки трансформатора разная. Одни участки обмотки подвержены более высокому нагреву, чем другие. В участках с наиболее высокой температурой скорость старения изоляционного материала происходит быстрее. Такие участки первыми достигают предельного состояния и определяют эксплуатационную надежность всего трансформатора.

Зависимость температуры наиболее нагретой точки и средней температуры в обмотке может изменяться в зависимости от конструкции. Уравнения для расчета температуры наиболее нагретой точки являются обобщающими, что может подразумевать погрешности, и, в свою очередь, влечет неточность расчета срока службы трансформатора. Изготовители могут обеспечить более точной информацией о температуре наиболее нагретой точки именно для производимой ими конструкции трансформатора.

При расчете несущей способности трансформатора, температуру окружающей среды нужно рассматривать как функцию нагрузки.

Приложение Б
(справочное)

Расчеты срока службы на примере расчетов трех режимов нагрузки

Б.1 Пример 1: Нагрузка при постоянной температуре

Б.1.1 Исходные данные

Разница (рост) температуры наиболее нагретой точки больше окружающей температуры: 125 °С

Температура окружающей среды: 30 °С (постоянная)

Температура системы изоляции: 130 °С (класс В)

Время нагрузки: 1 неделя (168 ч)

Б.1.2 Расчет

По уравнению (5)

Термодинамическая температура наиболее нагретой точки, К:

$$273 + 30 + 125 = 428 \text{ К}.$$

Из таблицы 1

Коэффициенты *a* и *b:*

$$a = 1{,}72 \cdot 10^{-15} \text{ ч}, \; b = 18\,115.$$

По формуле (7) определяют скорость термического старения

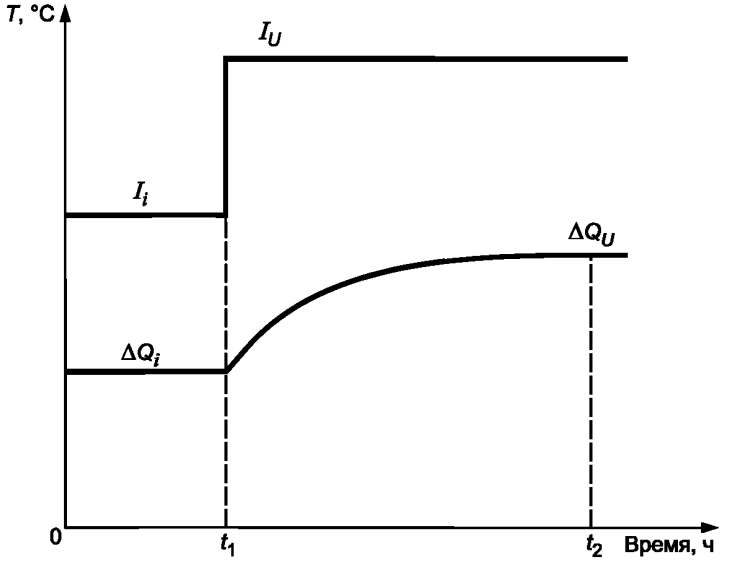
$$K = 180000 \cdot (1{,}72 \cdot 10^{-15})^{-1} \cdot e^{\left(-\frac{18155}{428}\right)} = 43{,}48 \text{ ч} —$$

расход срока службы в час.

При времени нагрузки, равной 168 ч, расчетный срок службы в процессе одной недели при этой температуре составит

$$43{,}48 \cdot 168 = 7305 \text{ ч}$$

от всего срока службы трансформатора.



Верхняя кривая: начальная и максимальная нагрузки.
Нижняя кривая: рост температуры свыше температуры окружающей среды

Рисунок Б.1 — Ступенчатое изменение кривой нагрузки

Вероятный срок службы при номинальной температуре наиболее нагретой точки 120 °С составит 180 000 ч. Тогда за одну неделю при температуре наиболее нагретой точки 155 °С он составит

$$100 \cdot \frac{7305}{180\,000} = 4{,}06 \%$$

от номинального срока службы трансформатора.

Б.2 Пример 2

Ток нагрузки I_i при температуре t_1 с последующим током нагрузки I_U и температурой t_2.

Б.2.1 Общее положение

Когда ток нагрузки внезапно изменяется от уровня I_1 до уровня I_2, допускается, что температура наиболее нагретой точки от начального роста температуры $\Delta\theta_1$ переходит в $\Delta\theta_2$ по экспоненциальной зависимости (формула (16)). Как показано на рисунке Б.1.

Б.2.2 Исходные данные:

$I_i = 0{,}8$, период времени $t_1 = 10$ ч;

I_i — начальная нагрузка;

$I_U = 1{,}2$, период времени $t_2 = 10$ ч;

I_U — значение нагрузки после возрастания;

номинальная постоянная времени для рассмотренной обмотки: τ_r =0,5 ч;
температура окружающей среды: 30 °С (постоянная, независимо от тока нагрузки);
температура изоляционной системы: 155 °С;
температура наиболее нагретой точки обмотки в нулевой момент времени (обозначается — $\Delta\theta_{HSi}$);
средний рост температуры обмотки при номинальном токе $\Delta\theta_{Wr}$ = 80 °С;
режим работы с естественным воздушным охлаждением.

Б.2.3 Расчет

Формулу (11) используют для расчета $\Delta\theta_{HSi}$ и $\Delta\theta_{HSu}$:

$$\Delta\theta_{HSi} = 1{,}25 \cdot 80 \cdot 0{,}8^{1{,}6} = 70\ °C;$$

$$\Delta\theta_{HSu} = 1{,}25 \cdot 80 \cdot 0{,}8^{1{,}6} = 134\ °C;$$

$$\Delta\theta_{HS,\,r} = 1{,}25 \cdot 80 = 100\ °C.$$

Формулу (20) используют для определения постоянной времени при изменении роста температуры наиболее нагретой точки обмотки от 70 °С до 134 °С:

$$\tau = 0{,}5 \cdot \frac{\frac{134}{100} - \frac{70}{100}}{\left(\frac{134}{100}\right)^{1{,}25} - \left(\frac{70}{100}\right)^{1{,}25}} = 0{,}399.$$

Формула (16) применяется для определения мгновенного значения $\Delta\theta_{HS}$ в любой период времени t интервала времени перехода $\Delta\theta_{HS}$ из $\Delta\theta_{HSi}$ в $\Delta\theta_{HSu}$:

$$\Delta\theta_{HSu} = 70 + (134 - 70) \cdot \left[1 - e^{\left(-\frac{t}{0{,}399}\right)}\right].$$

При постепенном росте $\Delta\theta_{HS}$ повышается скорость термического старения. См. рисунок Б.2.

$\Delta\theta_{HS} = \Delta\theta_{HSu}$, когда $t \approx 5 \cdot \tau = 5 \cdot 0{,}399 = 1{,}995$ ч или 2 ч.

Для определения расчетного срока службы во время переходного периода значений $\Delta\theta_{HSi}$ и $\Delta\theta_{HSu}$ мгновенные значения времени, разницы температур наиболее нагретой точки $\Delta\theta_{HS}$, термодинамической температуры T и скорости термического старения k внесены в таблицу Б.1 на временной промежуток t — t_{21} = 0 — 2ч.

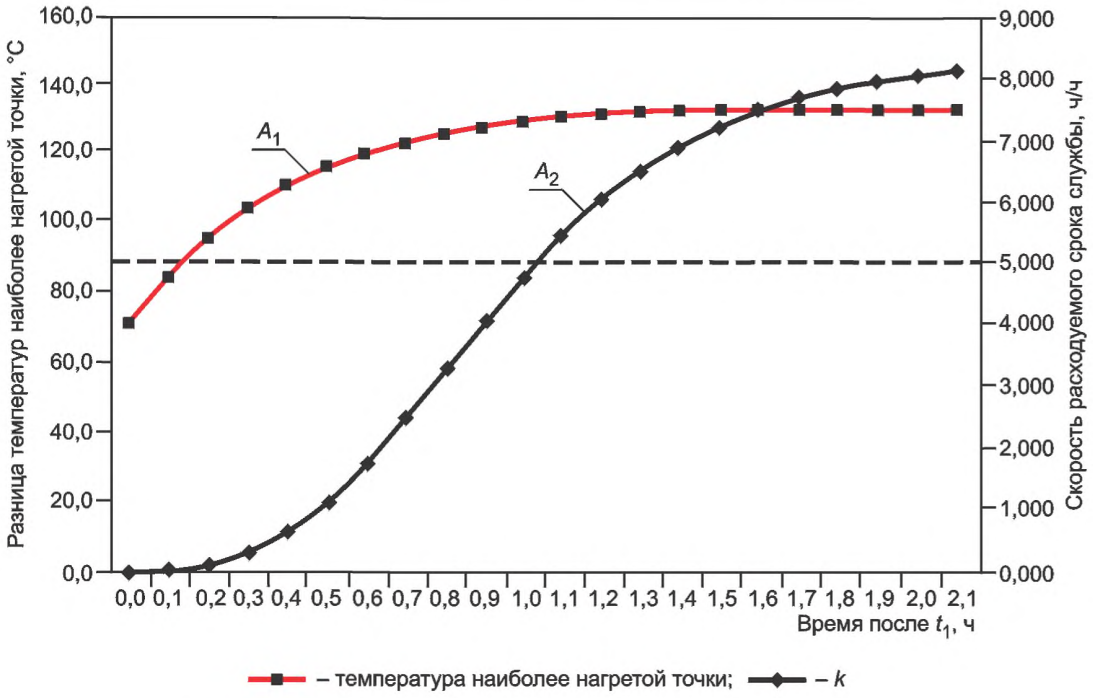
Таблица Б.1 — Расчет расхода срока службы

Время, ч	Изменение температуры наиболее нагретой точки, °С	Термодинамическая температура, К	Скорость термического старения, ч/ч	Расход срока службы, ч
	Формула (16)	Формула (5)	Формула (7)	Формула (9)
0	70,0	373	0,003	0,000 0
0,1	84,2	387,2	0,020	0,002 0
0,2	95,2	398,2	0,088	0,008 0
0,3	103,8	406,8	0,260	0,026 0
0,4	110,5	413,5	0,586	0,058 6
0,5	115,7	418,7	1,086	0,108 6
0,6	119,8	422,8	1,735	0,173 5
0,7	122,9	425,9	2,484	0,248 4
0,8	125,4	428,4	3,272	0,327 2
0,9	127,3	430,3	4,046	0,404 6
1	128,8	431,8	4,768	0,476 8
1,1	129,9	432,9	5,413	0,541 3
1,2	130,8	433,8	5,972	0,597 2
1,3	131,5	434,5	6,445	0,644 5
1,4	132,1	435,1	6,838	0,683 8
1,5	132,5	435,5	7,160	0,716 0

Окончание таблицы Б.1

Время, ч	Изменение температуры наиболее нагретой точки, °С	Термодинамическая температура, К	Скорость термического старения, ч/ч	Расход срока службы, ч
	Формула (16)	Формула (5)	Формула (7)	Формула (9)
1,6	132,8	435,8	7,420	0,742 0
1,7	133,1	436,1	7,629	0,762 9
1,8	133,3	436,3	7,796	0,779 6
1,9	133,5	436,5	7,928	0,792 8
2	133,6	436,6	8,032	0,803 2
2,1	133,7	436,7	8,114	0,811 4
			Итого, L_c	9,709 3

Значения $\Delta\theta_{HS}$ и k представлены по координатам времени на рисунке Б.2



Верхняя кривая — рост разницы температуры наиболее нагретой точки, °С.
Нижняя кривая: скорость расходуемого срока от всего срока службы трансформатора, соответствующая росту температуры наиболее нагретой точки

Рисунок Б.2 — Рост разницы температуры наиболее нагретой точки и расходуемого срока службы

Расходуемая часть срока службы для 2 ч продолжительного периода перехода из $\Delta\theta_{HSi}$ в $\Delta\theta_{HSu}$ представлена в виде участка, расположенного под нижней сплошной кривой. Есть несколько способов определить этот участок. Простой способ заключается в следующем: провести прямую горизонтальную линию через диаграмму. Линия поделит ось ординат пополам так, что визуально две части A_1 и A_2 будут равны. Границы части A_1 определены левой осью ординат, горизонтальной линией и сплошной кривой. Границы части A_2 определены правой осью ординат, горизонтальной линией и сплошной кривой. Ордината на правой оси считываема, и часть под кривой k равна произведению этой ординаты и времени в правом конце оси абсцисс. В этом случае:

$$5{,}0 \cdot 2 = 10 \text{ ч.}$$

Следовательно, расчетный срок службы в течение двух ч данных интервалов времени с возрастанием разницы температуры наиболее нагретой точки от 70 °С до 134 °С будет 10 ч.

Дополнительно к этим часам расходуется часть срока службы, равная 10 ч при 70 °С разницы температуры наиболее нагретой точки, и 10 – 2 = 8 ч при разнице температуры 134 °С. Два последних добавления могут быть рассчитаны по формуле (9).

$$L_{C2} = 180000 \cdot 10 \cdot (9{,}60 \cdot 10^{-17})^{-1} \cdot e^{\left(\frac{2047_5}{(273+10_0)}\right)} = 0{,}03 \text{ ч};$$

$$L_{C2} = 180000 \cdot 8 \cdot (9{,}60 \cdot 10^{-17})^{-1} \cdot e^{\left(\frac{2047_5}{(273+16_4)}\right)} = 67{,}28 \text{ ч}.$$

Они равны 0,03 ч и 67,28 ч соответственно.

Полный расчетный срок службы в течение полных 20 ч составит:

0,03 + 9,71 + 67,28 = 77,02 ч.

Определить часть под кривой *k* в интервал времени возможно методом числового интегрирования прямоугольника и трапеций по формуле Симпсона.

Кривая *k* имеет полиномиальную форму, что позволяет легко ее объединить и получить размер части под кривой. Для этого метода срок службы равен 8,54 ч, если мера исчисления равна 0,01 ч.

Б.3 Пример 3: Ток переменной нагрузки

Б.3.1 Исходные данные

Коэффициент тока нагрузки изменяется от 0,7 до 1,2 в течение 24 часов.

Номинальное значение постоянной времени для рассматриваемой обмотки τ = 0,5 ч.

Температура окружающей среды 30 °С, постоянная (независимая от тока нагрузки).

Температура системы изоляции: 180 °С.

Средняя разница температуры обмотки при номинальном токе $\Delta\theta_{Wr}$=100 °С.

Режим работы: с естественным воздушным охлаждением.

Б.3.2 Расчет

В двух левых графах таблицы Б.2 и на рисунке Б.3 приведен цикл нагрузки с почасовыми значениями тока нагрузки.

Таблица Б.2

Время, ч	Коэффициент нагрузки	Предельная разница температуры наиболее нагретой точки, °С	Постоянная времени, ч	Разница температуры наиболее нагретой точки, °С	Термодинамическая температура, К	Скорость старения *k*, ч/ч	Расходуемый срок службы, ч/ч	Фактор	Произведение *k* на фактор, ч
		Формула (11)	Формула (20)	Формула (16)	Формула (3)	Формула (7)			
0	0,700	70,64		70,64	373,6	0,000	0,000	1	0,000
1	0,722	74,23	0,458	73,82	376,8	0,000	0,000	4	0,000
2	0,788	85,38	0,448	84,14	387,1	0,001	0,001	2	0,001
3	0,859	98,02	0,432	96,64	399,6	0,004	0,004	4	0,014
4	0,956	116,32	0,416	114,54	417,5	0,042	0,042	2	0,085
5	0,957	116,51	0,407	116,34	419,3	0,054	0,054	4	0,214
6	0,962	117,49	0,407	117,39	420,4	0,061	0,061	2	0,123
7	0,991	123,20	0,404	122,72	425,7	0,122	0,122	4	0,486
8	1,029	130,85	0,398	130,19	433,2	0,309	0,309	2	0,617
9	1,044	133,92	0,394	133,62	436,6	0,468	0,468	4	1,872
10	1,054	135,97	0,392	135,79	438,8	0,607	0,607	2	1,214
11	1,080	141,38	0,390	140,95	444,0	1,116	1,116	4	4,464
12	1,104	146,44	0,386	146,03	449,0	2,004	2,004	2	4,008
13	1,152	156,76	0,381	155,98	459,0	6,079	6,079	4	24,317
14	1,163	159,16	0,77	158,94	461,9	8,375	8,375	2	16,750
15	1,200	167,34	0,374	166,76	469,8	19,176	19,176	4	76,702
16	1,159	158,29	0,374	158,87	461,9	8,317	8,317	2	16,635

Окончание таблицы Б.2

Время, ч	Коэффициент нагрузки	Предельная разница температуры наиболее нагретой точки, °С	Постоянная времени, ч	Разница температуры наиболее нагретой точки, °С	Термодинамическая температура, К	Скорость старения k, ч/ч	Расходуемый срок службы, ч/ч	Фактор	Произведение k на фактор, ч
		Формула (11)	Формула (20)	Формула (16)	Формула (3)	Формула (7)			
17	1,109	147,50	0,380	148,32	451,3	2,600	2,600	4	10,399
18	1,087	142,85	0,385	143,26	446,3	1,459	1,459	2	2,917
19	0,982	121,42	0,395	123,15	426,2	0,128	0,128	4	0,514
20	0,810	89,22	0,418	92,32	395,3	0,002	0,002	2	0,004
21	0,751	79,06	0,442	80,43	383,4	0,000	0,000	4	0,001
22	0,720	73,90	0,452	74,62	377,6	0,000	0,000	2	0,000
23	0,719	73,74	0,456	73,83	376,8	0,000	0,000	4	0,000
24	0,700	70,64	0,459	71,00	374,0	0,000	0,000	1	0,000

Для расчета значения расходуемого срока службы за 24 ч в таблицу Б.2 одновременно вносят значения времени, разницы температур наиболее нагретой точки $\Delta\theta_{HS}$, термодинамической температуры T и скорости теплового старения k.

Необходимо учитывать, что в течение цикла значение постоянной времени меняется.

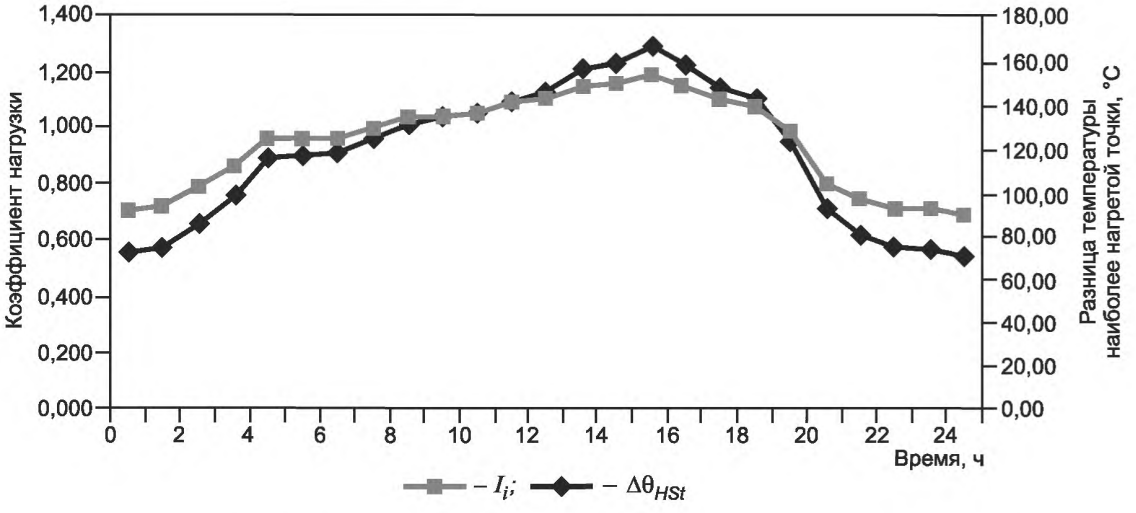


Рисунок Б.3 — Ток нагрузки и рост температуры наиболее нагретой точки обмотки

Кривая на рисунке Б.4 показывает, как изменяется скорость термического старения за цикл в 24 ч. Расходуемый срок службы за цикл равен части, расположенной под кривой.

Определить значение части графика под кривой можно с помощью формулы числового интегрирования Симпсона

$$\int_b^a f(t)dt \approx \frac{b-a}{6n} \cdot (y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + 2y_2 +, \ldots, 4y_{2n-1} + y_{2n}),$$

где $2n$ — число равно поделенных интервалов в полном интервале от a до b.

В настоящем примере $2n = 24$ ($n = 12$), а координаты $y_0 \cdot y_1 \cdot y_2$ и т.д. — это значения k, $b = 24$ и $a = 0$.

Можно составить таблицу Б.3.

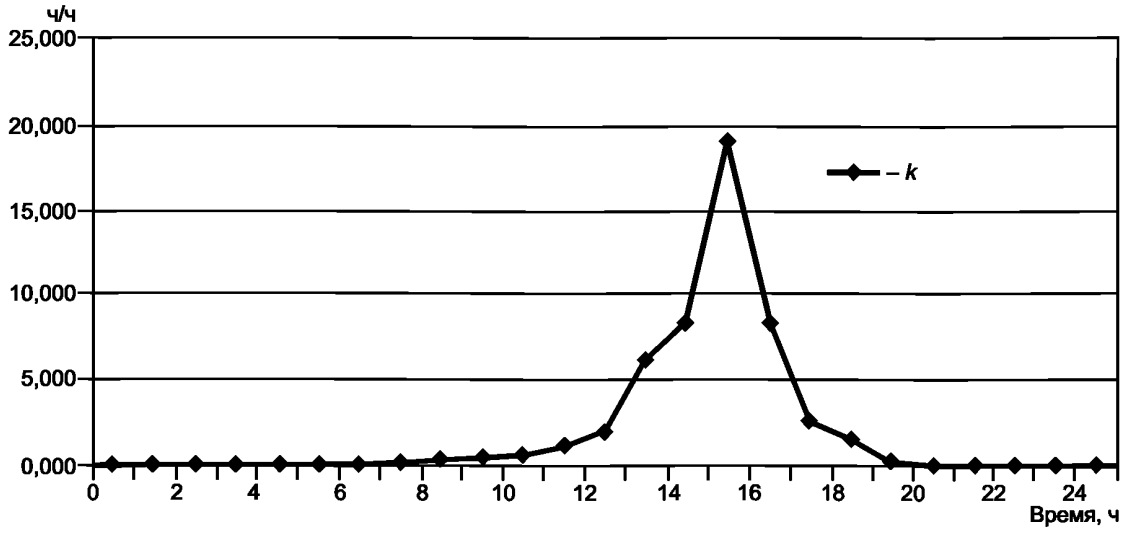


Рисунок Б.4 — Скорость теплового старения в зависимости от времени

Таблица Б.3 — Расчет расходуемого срока службы

Время, ч	Расход срока службы на эксплуатацию, ч/ч	Фактор, ч	Произведение *k* на фактор, ч
	Формула (9)		
0	0,000	1	0,000
1	0,000	4	0,000
2	0,001	2	0,001
3	0,004	4	0,014
4	0,042	2	0,085
5	0,054	4	0,214
6	0,061	2	0,123
7	0,122	4	0,486
8	0,309	2	0,617
9	0,468	4	1,872
10	0,607	2	1,214
11	1,116	4	4,464
12	2,004	2	4,008
13	6,079	4	24,317
14	8,375	2	16,750
15	19,176	4	76,702
16	8,317	2	16,635
17	2,600	4	10,399
18	1,459	2	2,917
19	0,128	4	0,514
20	0,002	2	0,004
21	0,000	4	0,001
22	0,000	2	0,000
23	0,000	4	0,000
24	0,000	1	0,000
		Итого	161,34

Получаем значение части, расположенной под кривой на рисунке Б.4:

$$\frac{24}{6 \cdot 12} \cdot 161{,}34 = 53{,}78 \text{ ч.}$$

Это значит, что в течение заданного цикла нагрузки 24 ч расходуется 53,78 ч от всего срока службы, равного 180 000 ч, что составит 0,0299 % номинального срока службы.

Приложение В
(справочное)

Таблица В.1 — Перечень символов

Символ	Значение	Единица измерения
a	Постоянная уравнения Аррениуса	ч
b	Постоянная уравнения Аррениуса	К
C	Эффективная термическая мощность обмотки	
C_T	Температурная поправка на сопротивление при изменении температуры	Вт · мин/°С или Вт · ч/°С
I	Коэффициент нагрузки на единицу	
I_i	Начальный коэффициент нагрузки	
I_n	Коэффициент нагрузки n на единицу	
I_U	Предельный коэффициент нагрузки	
k	Скорость теплового старения как расходуемый срок службы в часах в час — время эксплуатации при температуре	ч/ч
K_r	Относительная скорость теплового старения при постоянной температуре наиболее нагретой точки, выраженная в процентах скорости старения, что дает 180 000 ч срока службы	%
L	Срок службы	ч
L_C	Расходуемый срока службы, выраженный в часах, при постоянной температуре наиболее нагретой точки T в кельвинах в течение какого-то времени t в часах	ч
m	Эмпирическая постоянная, равная 0,8	
P_r	Общие потери в обмотке (потери на вихревые токи и на сопротивление) в условиях номинальной нагрузки и роста температуры	Вт
q	Эмпирическая постоянная для расчета роста температуры наиболее нагретой точки при заданной температуре	
t	Время	мин
T	Термодинамическая температура наиболее нагретой точки	К
T_i	Температура изоляционной системы (тепловой индекс ТИ)	°С
T_k	Постоянная температуры для проводника, состоящего на 225 из алюминия и на 235 из меди	
X	Эмпирическая постоянная, используется для расчета естественного охлаждения, равна 1 (до получения результатов испытаний)	
Z	Принятый фактор наиболее нагретой точки, равный 1,25	
θ_a	Температура окружающей среды	°С
θ_e	Определяющее содействие в росте температуры наиболее нагретой точки обмотки без нагрузки	°С
θ_{HS}	Температура наиболее нагретой точки в заданных условиях (нагрузка I, температура окружающей среды...)	°С
$\theta_{HS, r}$	Номинальная температура наиболее нагретой точки обмотки, вычисленная или подтвержденная испытаниями температура наиболее нагретой точки на единицу нагрузки	°С
$\Delta\theta_{HS}$	Изменение температуры наиболее нагретой точки на единицу нагрузки I	°С

Окончание таблицы В.1

Символ	Значение	Единица измерения
$\Delta\theta_{HS,\,r}$	Изменение температуры наиболее нагретой точки при номинальной нагрузке	°С
$\Delta\theta_{HSn}$	Изменение температуры наиболее нагретой точки, превышающей температуру окружающей среды при заданной нагрузке	°С
$\Delta\theta_i$	Исходное изменение температуры наиболее нагретой точки при предварительной нагрузке, температура	°С
$\Delta\theta_t$	Изменение температуры наиболее нагретой точки во времени *t* после изменения режима нагрузки	°С
$\Delta\theta_U$	Конечное изменение температуры наиболее нагретой точки при значении перегрузки I_U до устойчивого состояния изменения температуры наиболее нагретой точки	°С
$\Delta\theta_{Wr}$	Среднее изменение температуры наиболее нагретой точки при номинальной нагрузке	°С
τ	Постоянная времени для трансформатора в заданной нагрузке	мин
τ_R	Постоянная времени для трансформатора в номинальной нагрузке	мин

Библиография

[1] МЭК 60076-11:2004 Силовые трансформаторы — Часть 11: Сухой трансформатор

[2] МЭК 61378-1:1997 Преобразовательный трансформатор — Часть 1: Трансформаторы для промышленного использования

[3] МЭК 60216-2:2005 Электрические изоляционные материалы — Свойства теплостойкости — Часть 2: Определение свойств теплостойкости электрических изоляционных материалов — Выбор критерия проверки

[4] МЭК 60216-1:2001 Электрические изоляционные материалы — Свойства теплостойкости — Часть 1: Процессы старения и оценка результатов испытаний

[5] МЭК 60216-3:2006 Электрические изоляционные материалы — Свойства теплостойкости — Часть 3: Инструкция по расчету характеристик теплостойкости

[6] МЭК 60216-4-1:2006 Электрические изоляционные материалы — Свойства теплостойкости — Часть 4-1: Печи старения — Однокамерные печи

[7] МЭК 60216-4-2:2000 Электрические изоляционные материалы — Свойства теплостойкости — Часть 4-2: Печи старения — Муфельные печи для использования при температурах выше 300 °С

[8] МЭК 60216-4-3:2000 Электрические изоляционные материалы — Свойства теплостойкости — Часть 4-3: Печи старения- Многокамерные печи

[9] МЭК 60216-5:2008 Электрические изоляционные материалы — Свойства теплостойкости — Часть 5: Определение относительного индекса теплостойкости (ОИТ) изоляционных материалов

[10] МЭК 60216-6:2006 Электрические изоляционные материалы — Свойства теплостойкости — Часть 6: Определение индексов теплостойкости (ТИ и ОИТ) изоляционных материалов при использовании методом выделения определенного периода времени

[11] МЭК 60076-1:2000 Силовые трансформаторы — Часть 11: Сухой трансформатор

[12] МЭК 60076-2:1993 Силовые трансформаторы — Часть 2: Рост температуры

УДК 621.314:006.354 ОКС 29.180 ОКП 01 1100

Ключевые слова: силовые трансформаторы, руководство по нагрузке, сухие трансформаторы

Редактор *М.В. Глушкова*
Технический редактор *Н.С. Гришанова*
Корректор *А.С. Черноусова*
Компьютерная верстка *А.В. Бестужевой*

Сдано в набор 16.04.2012. Подписано в печать 18.05.2012. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 3,26. Уч.-изд. л. 2,70. Тираж 121 экз. Зак. 453.

ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 123995 Москва, Гранатный пер., 4.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru
Набрано во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» на ПЭВМ.
Отпечатано в филиале ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» — тип. «Московский печатник», 105062 Москва, Лялин пер., 6.

gost.e-ecolog.ru