ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р МЭК 60287-3-2— 2011

КАБЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ. РАСЧЕТ НОМИНАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ НАГРУЗКИ

Часть 3-2

Разделы, касающиеся условий эксплуатации. Экономическая оптимизация размера силовых кабелей

IEC 60287-3-2:1995
Electric cables — Calculation of the current rating — Part 3: Sections on operating conditions — Section 2: Economic optimization of power cable size
(IDT)

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 на основе аутентичного перевода на русский язык стандарта, указанного в пункте 4, который выполнен Открытым акционерным обществом «Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности» (ОАО «ВНИИКП»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 46 «Кабельные изделия»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 сентября 2011 г. № 254-ст

4 Настоящий стандарт идентичен международному стандарту МЭК 60287-3-2:1995 «Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 3. Разделы, касающиеся условий эксплуатации. Раздел 2. Экономическая оптимизация размера силовых кабелей» (IEC 60287-3-2:1995 «Electric cables — Calculation of the current rating — Part 3: Sections on operating conditions — Section 2: Economic optimization of power cable size»).

Изменение № 1:1996 к указанному международному стандарту, принятое после его официальной публикации, внесено в текст настоящего стандарта и выделено двойной вертикальной линией, расположенной на полях напротив соответствующего текста, а обозначение и год принятия изменения приведены в скобках после соответствующего текста.

При применении настоящего стандарта рекомендуется использовать вместо ссылочных международных стандартов соответствующие им национальные стандарты Российской Федерации, сведения о которых приведены в дополнительном приложении ДА

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 Обозначения 2
4 Расчет общей стоимости 3
5 Определение экономичных размеров жил 5
5.1 Первый подход: диапазон экономичного тока для каждой жилы в серии размеров 5
5.2 Второй подход: экономичный размер жилы для заданной нагрузки 5
Приложение А (справочное) Примеры расчета экономичных размеров жил 7
Приложение В (справочное) Средние значения температуры и электрического сопротивления жилы 16
Приложение ДА (справочное) Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов национальным стандартам Российской Федерации и действующим в этом качестве межгосударственным стандартам 19

Введение

Серия стандартов МЭК 60287 состоит из трех частей и поделена на разделы для удобства внесения изменений и дополнений.

Каждая часть поделена на следующие разделы, которые издаются как отдельные стандарты:

- часть 1: Уравнения для расчета номинальной токовой нагрузки (100 %-ный коэффициент нагрузки) и расчет потерь;
- часть 2: Тепловое сопротивление;
- часть 3: Разделы, касающиеся условий эксплуатации.

МЭК 60287-3-2 заменяет МЭК 61059.

0.1 Основные положения

Приведенная в настоящем стандарте процедура обычно используется для выбора размера кабеля с минимально допустимым сечением жил, что минимизирует первоначальные вложения в кабель. При этом не учитывают потери во время эксплуатации кабеля.

Увеличивающаяся стоимость и значительные потери электроэнергии, которые имеют место при максимальных рабочих температурах с применением новых изоляционных материалов (например, при температуре 90 °С для изоляции из сшитого полиэтилена и этиленпропиленовой резины) требуют, чтобы при выборе размера кабеля тщательно учитывались экономические факторы. Должны быть минимизированы не только первоначальные затраты, но и сумма первоначальных затрат и затрат на потери в течение срока эксплуатации. Исходя из последнего условия, выбор большего размера жилы по сравнению с выбранным на основании минимальной первоначальной стоимости приведет к меньшим потерям электроэнергии при том же токе, что даст экономию в течение срока эксплуатации.

Будущие затраты на потери электроэнергии в течение срока эксплуатации кабеля могут быть рассчитаны путем соответствующих оценок роста нагрузки и стоимости электроэнергии. Наиболее экономичное сечение жилы достигается тогда, когда сумма будущих затрат на потери электроэнергии, первоначальная стоимость покупки и стоимость монтажа минимальны.

Экономия общих затрат, в случае если было выбрано большее сечение жилы, чем определено температурными ограничениями, вследствие значительного уменьшения затрат на джоулевы потери сравнима с увеличением стоимости покупки. Для значений экономических и электрических параметров, используемых в настоящем стандарте, достигается экономия около 50 % общей суммы затрат на покупку и эксплуатацию (см. раздел А.6 приложения А). Расчеты для более коротких финансовых периодов дают тот же эффект.

Следующей важной особенностью, показываемой на примерах, является то, что, возможно, экономия не так сильно зависит от сечения жилы, если значение сечения находится в области экономичных значений (см. рисунок А.3 приложения А). Отсюда следуют два вывода:

a) Влияние ошибок в финансовых данных, особенно определяющих будущие затраты, незначительно. В то же время желательно использовать данные, имеющие наилучшую практически применимую точность, и значительной экономии можно достичь, используя данные, основанные на оценках.

b) Другие соображения при выборе сечения жилы, влияющие на общую экономику установленного кабеля, такие как ток короткого замыкания, падение напряжения и оптимизация размера, могут быть соответствующим образом учтены, незначительно снижая выгоду от использования кабеля экономичного размера.

0.2 Экономические аспекты

Для того, чтобы объединить затраты на покупку и монтаж с затратами на потери электроэнергии в течение срока эксплуатации кабеля, необходимо выразить их в сравнимых экономических величинах, которые относились бы к одному и тому же времени. В качестве такого времени удобно использовать дату оплаты монтажа и ссылаться на него как на «настоящее время». «Будущие» затраты на потери электроэнергии преобразовывают в эквивалентные им «настоящие значения». Преобразование осуществляется с помощью процесса дисконтирования, дисконтная ставка должна быть связана со стоимостью заемных денег.

В приведенном в настоящем стандарте методе инфляцию не учитывают на основании того, что она влияет как на стоимость заемных денег, так и на стоимость электроэнергии. Если эти элементы влияния учитывают в течение всего периода и инфляция примерно одинаково воздействует на них, то выбор экономичного сечения жилы может быть удовлетворительно проведен и без дополнительных сложностей, связанных с учетом инфляции.

Для расчета действующего значения затрат на потери электроэнергии выбирают соответствующие значения будущего наращивания нагрузки, ежегодных увеличений цены одного киловатт-часа электроэнергии и ежегодных дисконтных ставок в течение периода эксплуатации кабеля, который может быть 25 лет и более. В настоящем стандарте невозможно привести руководство по этим аспектам, т. к. они зависят от условий и финансовых ограничений по каждой отдельной прокладке кабеля. В настоящем стандарте приведены только соответствующие формулы; то, какие экономические факторы будут учитываться, определяется соглашением между разработчиком и потребителем.

Формулы, приведенные в настоящем стандарте, применяют непосредственно, но при их применении следует учитывать, что финансовые параметры остаются неизменными в течение срока эксплуатации кабеля. При этом вышеизложенные замечания по влиянию точности этих параметров применимы и здесь.

Существует два подхода при расчете экономичного сечения, основанные на одних и тех же финансовых концепциях. Первый подход к расчету при рассмотрении серии размеров жил предполагает расчет диапазона экономичных токов для каждого размера жилы, предусматриваемого для конкретных условий прокладки, и затем выбор размера, диапазон экономичного тока которого содержит требуемое значение тока нагрузки. Этот подход, применимый для одинаковых прокладок кабеля, находится в стадии рассмотрения. Второй подход к расчету, который может быть более подходящим при одиночной прокладке, предполагает расчет оптимального сечения жилы для требуемого значения нагрузки и затем выбор ближайшего стандартного размера жилы.

0.3 Другие критерии

Другие критерии при выборе размера жилы, например, ток короткого замыкания и его длительность, падение напряжения и оптимизация размера кабеля, должны также учитываться. Однако кабель, выбираемый на основании экономичного размера жилы, может соответствовать и другим требованиям и, следовательно, может быть полезной следующая последовательность при выборе размера кабеля:

a) расчет экономичного сечения;

b) проверка методами по МЭК 60287-1, МЭК 60287-2 и МЭК 60853 того, что жила размером, определенным по перечислению a), способна выдерживать максимальную нагрузку, ожидаемую в конце срока эксплуатации кабеля без превышения максимально допустимого значения температуры жилы;

c) проверка того, что кабель выбранного размера сможет выдерживать возможные в будущем токи короткого замыкания и замыкания соответствующей длительности на землю;

d) проверка того, что падение напряжения на конце кабеля будет находиться в допустимых пределах;

e) проверка на соответствие другим критериям, учитываемым при прокладке кабеля.

При завершении экономического выбора достаточное внимание должно быть уделено последствиям перерыва в подаче напряжения. Может возникнуть необходимость в использовании жилы с бóльшим сечением, чем требуется по условиям нормальной нагрузки, и/или в проведении выбора с учетом экономических показателей, или соответствующим образом адаптировать кабельную сеть.

Другие стоимостные компоненты могут проявиться при финансовых последствиях принятия ошибочного решения с учетом степени его вероятности. Однако последствия ошибочных решений относятся к теории принятия решений, которая не рассматривается в настоящем стандарте.

Таким образом, выбор экономичного размера кабеля является только частью общего экономического обоснования кабельной системы и может по важности уступать другим важным экономическим факторам.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

КАБЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ. РАСЧЕТ НОМИНАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ НАГРУЗКИ

Часть 3-2

Разделы, касающиеся условий эксплуатации. Экономическая оптимизация размера силовых кабелей

Electric cables. Calculation of the current rating. Part 3-2. Sections on operating conditions. Economic optimization of power cable size

Дата введения — 2012—07—01

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает метод выбора размера кабеля на основании первоначальных инвестиционных затрат и будущих затрат на потери электроэнергии в течение срока эксплуатации кабеля.

(Измененная редакция, Изм. № 1).

Примечания

1 Не рекомендуется использовать метод, приведенный в настоящем стандарте, для кабелей, работающих в системах с равными или превышающими следующие напряжения (см. МЭК 60287-1-1):

Тип кабеля	Напряжение системы U_0, кВ
Кабели с бумажной пропитанной изоляцией:	
- со сплошной изоляцией	38;
- маслонаполненные и газонаполненные	63,5.
Кабели с изоляцией другого типа:	
- бутилкаучук	18;
- этиленпропиленовая резина	63,5;
- поливинилхлоридный пластикат	6;
- полиэтилен (низкого и высокого давления)	127;
- сшитый полиэтилен (ненаполненный)	127;
- сшитый полиэтилен (наполненный)	63,5.

2 Варианты метода, приведенного в настоящем стандарте для учета диэлектрических потерь, находятся в стадии рассмотрения.

В настоящем стандарте не рассматриваются такие вопросы, как обслуживание, потери электроэнергии в системах принудительного охлаждения и изменение стоимости электроэнергии в зависимости от времени суток.

Пример применения метода к гипотетической системе электроснабжения приведен в приложении А.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие международные стандарты:

МЭК 60228:1978* Токопроводящие жилы изолированных кабелей (IEC 60228:1978 Conductors of insulated cables)

* Заменен. Действует МЭК 60228:2004.

Издание официальное

МЭК 60287-1-1:1994* Кабели электрические — Расчет номинальной токовой нагрузки — Часть 1: Уравнения для расчета номинальной токовой нагрузки (100 %-ный коэффициент нагрузки) и расчет потерь — Раздел 1: Общие положения (IEC 60287-1-1:1994 Electric cables — Calculation of the current rating — Part 1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation losses — Section 1: General)

МЭК 60287-2-1:1994 Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 2. Тепловое сопротивление. Раздел 1. Расчет теплового сопротивления (IEC 60287-2-1:1994 Electric cables — Calculation of the current rating — Part 2: Thermal resistance — Section 1: Calculation of thermal resistance)

МЭК 60853 (все части) Расчет токовой нагрузки кабелей в циклическом и аварийном режимах работы (IEC 60853 (all parts) Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables)

Примечание — Для датированных ссылок применяется только указанное издание. Для недатированных ссылок применяется последнее издание указанного стандарта (со всеми поправками).

3 Обозначения

В настоящем стандарте применены следующие обозначения:

A — переменная составляющая затрат на единицу длины, связанная с размером жилы, у.д.е.**/м · мм^2;

B — вспомогательная величина, определяемая уравнением (16);

C — постоянная составляющая затрат на единицу длины, относящаяся к расположению жил, у.д.е./м;

CT — общая стоимость кабельной системы, у.д.е.;

D — ежегодный требуемый платеж, у.д.е./Вт · год;

F — вспомогательная величина, определяемая уравнением (10), у.д.е./Вт;

I_{max} — максимальный ток нагрузки в первый год, т. е. наивысшее часовое среднее значение, А;

$I(t)$ — нагрузка как функция от времени, А;

l — длина кабеля, м;

CJ — настоящее значение затрат на джоулевы потери в течение N лет, у.д.е.;

N — период, охватываемый финансовыми расчетами, так называемый «экономический срок эксплуатации», лет;

N_p — число фазных жил в цепи;

N_C — число цепей с одинаковым типом и значением нагрузки;

P — стоимость одного ватт-часа при соответствующем уровне напряжения, у.д.е./Вт · ч;

CI — установленная стоимость рассматриваемого отрезка кабеля, у.д.е.;

CI_2 — установленная стоимость следующего большего стандартного размера жилы, у.д.е.;

CI_1 — установленная стоимость следующего меньшего стандартного размера жилы, у.д.е.;

$CI(S)$ — установленная стоимость кабеля как функция от его поперечного сечения, у.д.е.;

Q — вспомогательная величина, определяемая уравнением (8);

R — сопротивление кабеля переменному току на единицу длины, включая влияние y_p, y_s, λ_1, λ_2 (считается постоянной величиной при средней рабочей температуре, см.раздел 4), Ом/м;

R_2 — сопротивление переменному току на единицу длины следующего большего стандартного размера жилы, Ом/м;

R_1 — сопротивление переменному току на единицу длины следующего меньшего стандартного размера жилы, Ом/м;

$R(S)$ — сопротивление жилы переменному току на единицу длины как функция от ее поперечного сечения, Ом/м;

S — поперечное сечение жилы кабеля, мм^2;

---

* Действует МЭК 60287-1-1:2006.

** Условная денежная единица.

S_{ec} — экономичный размер жилы, мм^2;
T — время работы при максимальных джоулевых потерях, ч/год;
a — ежегодное увеличение I_{max}, %;
b — ежегодное увеличение P без учета инфляции, %;
i — дисконтная ставка, используемая для расчета настоящих значений, %;
r — вспомогательная величина, определяемая уравнением (9);
t — время, ч;
y_p — коэффициент эффекта близости, см. МЭК 60287-1-1;
y_s — коэффициент поверхностного эффекта, см. МЭК 60287-1-1;
α_{20} — температурный коэффициент электрического сопротивления жилы при 20 °С, 1/К;
θ — максимальная расчетная рабочая температура жилы, °С;
θ_a — температура окружающей среды, °С;
θ_m — средняя рабочая температура жилы, °С;
λ_1, λ_2 — коэффициенты потерь в оболочке и броне, см. МЭК 60287-1-1;
μ — коэффициент потерь в нагрузке, см. МЭК 60853;
ρ_{20} — удельное электрическое сопротивление жилы при температуре 20 °С (см. 5.2), Ом · м.

4 Расчет общей стоимости

Общую стоимость монтажа и обеспечения функционирования кабеля в течение срока его эксплуатации, выраженную в действующих значениях [при этом все финансовые величины выражены в условных денежных единицах (у.д.е.)], рассчитывают по формулам:

- общую стоимость

$$CT = CI + CJ, \quad (1)$$

где CI — стоимость проложенного отрезка кабеля, у.д.е.;

CJ — эквивалентные затраты на дату оплаты монтажа кабеля, т. е. действующее значение, на джоулевы потери в течение срока эксплуатации N лет, у.д.е.;

- оценку CJ:

общие затраты вследствие потерь состоят из двух частей: оплаты электроэнергии и оплаты дополнительного энергоснабжения для компенсации потерь, которые рассчитывают:

а) Затраты на оплату электроэнергии:

Потери электроэнергии, Вт · ч, в течение первого года равны

$$(I^2_{max} R l N_p N_c) T, \quad (2)$$

где I_{max} — максимальный ток нагрузки в первый год, А;

l — длина кабеля, м;

R — полное сопротивление жилы переменному току на единицу длины с учетом как поверхностного эффекта, так и эффекта близости y_p, y_s, а также потерь в металлических экранах и броне λ_1, λ_2, Ом/м.

Так как экономичный размер жилы обычно больше оптимального размера по температурным соображениям (т. е. размера, определенного по МЭК 60287-1, МЭК 60287-2 и/или МЭК 60853), то ее температура будет ниже, чем максимально допустимое значение температуры. При отсутствии более точной информации удобно считать R постоянной величиной, значение которой, соответствует температуре

$$(\theta - \theta_a)/3 + \theta_a,$$

где θ — максимальная расчетная температура жилы для рассматриваемого типа кабеля и

θ_a — температура окружающей среды.

Коэффициент 3 определен опытным путем, см. приложение В.

Примечание — Если требуется бóльшая точность (например, если вычислениями четко не определено, какой номинальный размер жилы должен быть выбран, или если вследствие роста нагрузки значение тока нагрузки в последние годы значительно выше значения первого года эксплуатации) может быть сделана более точная оценка температуры жилы с использованием в качестве отправной точки размера жилы, полученного исходя из приблизительной температуры, указанной выше.

Методы получения более точных оценок температуры и сопротивления жилы приведены в приложении В. В соответствии с этим методом экономичный размер определяют заново с использованием уточненного значения сопротивления жилы.

Влияние сопротивления жилы на выбор экономичного размера незначительно и редко требуется выполнять более одной итерации;

N_p — число фазных жил в цепи;

N_c — число цепей с одинаковыми типом и значением нагрузки;

T — время работы при максимальных джоулевых потерях, ч/год, т. е. число часов в году, в течение которых требовалось бы протекать максимальному току I_{max} для того, чтобы были получены те же ежегодные значения тепловых потерь, что и при протекании действительного изменяющегося тока нагрузки:

$$T = \int_0^{8760} \frac{I(t)^2 dt}{I_{max}^2}.$$

Если коэффициент потерь в нагрузке μ известен и может считаться постоянной величиной в течение срока эксплуатации, тогда

$$T = \mu \cdot 8760.$$

Для получения коэффициента потерь в нагрузке μ см. МЭК 60853;

t — время, ч;

$I(t)$ — токовая нагрузка как функция от времени, А.

Затраты, у.д.е., на потери в течение первого года эксплуатации равны

$$(I_{max}^2 RlN_p N_c)TP, \quad (3)$$

где P — стоимость одного ватт-часа при соответствующем уровне напряжения, у.д.е./Вт · ч.

b) Затраты на оплату дополнительного энергоснабжения

Затраты, у.д.е./год, на дополнительное энергоснабжение для компенсации потерь равны

$$(I_{max}^2 RlN_p N_c)D, \quad (4)$$

где D — ежегодный требуемый платеж, у.д.е./Вт · год.

Следовательно, общие затраты, у.д.е., на потери в течение первого года равны

$$(I_{max}^2 RlN_p N_c)(T \cdot P + D). \quad (5)$$

Если оплата происходит в конце года, тогда на момент оплаты монтажа кабеля настоящее значение общих затрат, у.д.е., на потери равно

$$\frac{(I_{max}^2 RlN_p N_c)(T \cdot P + D)}{\left(1 + \frac{i}{100}\right)}, \quad (6)$$

где i — дисконтная ставка без учета инфляции, %.

Аналогично действующее значение затрат CJ, у.д.е., на электроэнергию в течение N лет эксплуатации, пересчитанное на момент оплаты, равно

$$CJ = (I_{max}^2 RlN_p N_c)(T \cdot P + D) \frac{Q}{\left(1 + \frac{i}{100}\right)}, \quad (7)$$

где Q — коэффициент, учитывающий увеличение нагрузки, увеличение стоимости электроэнергии за N лет и дисконтную ставку, равный

$$\sum_{n=1}^{N} (r^{n-1}) = \frac{1 - r^N}{1 - r}, \quad (8)$$

$$r = \frac{\left(1 + \frac{a}{100}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{b}{100}\right)}{\left(1 + \frac{i}{100}\right)}, \quad (9)$$

где a — увеличение нагрузки за год, %;

b — увеличение стоимости электроэнергии за год без учета инфляции, %.

Там, где требуется проводить вычисления с жилами различных размеров, целесообразно выразить все параметры, за исключением тока и сопротивления жилы, одним коэффициентом F, у.д.е./Вт:

$$F = N_p N_c (T \cdot P + D) \frac{Q}{\left(1 + \frac{i}{100}\right)}. \quad (10)$$

Тогда общая стоимость CT, у.д.е., определяется выражением

$$CT = CI + I_{max}^2 RIF. \quad (11)$$

5 Определение экономичных размеров жил

5.1 Первый подход: диапазон экономичного тока для каждой жилы в серии размеров

Все размеры жил имеют диапазон экономичного тока для конкретных условий прокладки. Верхний и нижний пределы диапазона экономичного тока I_{max}, А, для конкретного размера жилы определяют следующими выражениями:

- нижний предел $I_{max} = \sqrt{\frac{CI - CI_1}{FI(R_1 - R)}}$; (12)

- верхний предел $I_{max} = \sqrt{\frac{CI_2 - CI}{FI(R - R_2)}}$, (13)

где CI — установленная стоимость отрезка кабеля, размер жилы которого рассматривается, у.д.е.;

R — сопротивление переменному току на единицу длины жилы рассматриваемого размера, Ом/м;

CI_1 — установленная стоимость отрезка кабеля с жилой следующего меньшего стандартного размера, у.д.е.;

R_1 — сопротивление переменному току на единицу длины жилы следующего меньшего стандартного размера, Ом/м;

CI_2 — установленная стоимость отрезка кабеля с жилой следующего большего стандартного размера, у.д.е.;

R_2 — сопротивление переменному току на единицу длины жилы следующего большего стандартного размера, Ом/м.

Примечания

1 Верхний и нижний пределы значения экономичного тока для жил всех размеров могут быть сведены в таблицу и использоваться для выбора наиболее экономичного размера жилы для конкретной нагрузки.

2 Верхний предел значения экономичного тока жилы одного размера является нижним пределом значения экономичного тока жилы следующего большего размера.

5.2 Второй подход: экономичный размер жилы для заданной нагрузки

5.2.1 Общее уравнение

Экономичный размер жилы S_{ec} — сечение, минимизирующее функцию общей стоимости, $CT(S)$, у.д.е.:

$$CT(S) = CI(S) + I_{max}^2 R(S) I \cdot F, \quad (14)$$

где $CI(S)$ и $R(S)$ — функции сечения S, см. 5.2.2.

Уравнение для отношения между $CI(S)$ и размером жилы может быть выведено из известной стоимости кабелей стандартных размеров. В общем случае, если приемлемое линейное отношение может быть получено для стоимости даже только для ограниченного диапазона размеров жил, оно должно использоваться. Это приведет к незначительной ошибке в результатах ввиду возможной неопределенности предполагаемых финансовых показателей для выбранного срока службы кабеля.

Согласно МЭК 60287-1-1 полное сопротивление жилы $R(S)$, Ом/м, может быть представлено функцией от площади его поперечного сечения:

$$R(S) = \frac{\rho_{20} B[1 + \alpha_{20}(\theta_m - 20)]}{S} 10^6; \quad (15)$$

$$B = (1 + y_p + y_s)(1 + \lambda_1 + \lambda_2), \quad (16)$$

где ρ_{20} — удельное электрическое сопротивление жилы постоянному току.

Примечание — Экономичный размер жилы, как правило, не будет равен стандартному размеру, и поэтому необходимо знать постоянное соотношение между сопротивлением и размером. Это достигается заданием значения удельного сопротивления для каждого материала, из которого изготовлена жила. Рекомендуемые значения для ρ_{20}: $18{,}35 \cdot 10^{-9}$ — для меди и $30{,}3 \cdot 10^{-9}$ — для алюминия. Эти значения являются не действительными для указанных материалов, а компромиссными значениями, выбранными так, чтобы сопротивление жил могло быть рассчитано непосредственно по их номинальным размерам, а не по действительным сечениям:

y_p, y_s — коэффициенты эффекта близости и поверхностного эффекта (см. МЭК 60287-1-1);

λ_1, λ_2 — коэффициенты потерь в оболочке и броне (см. МЭК 60287-1-1);

α_{20} — температурный коэффициент удельного электрического сопротивления конкретного материала жилы при температуре 20 °С, $К^{-1}$;

θ_m — температура жилы, см. пояснение к R в экспликации для уравнения (2), °С;

B — вспомогательная величина, определяемая уравнением (16), которая может быть рассчитана по МЭК 60287-1-1 с использованием вероятного значения для экономичного размера жилы;

S — сечение жилы кабеля, $мм^2$.

5.2.2 Линейная функция стоимости затрат на кабель

Если линейная модель может быть использована для определения значений первоначальных затрат, у.д.е., для рассматриваемого типа кабеля и его монтажа, тогда

$$CI(S) = l(A \cdot S + C), \tag{17}$$

где A — переменная составляющая затрат, относящаяся к размеру жилы, у.д.е./м · $мм^2$;

C — постоянная составляющая затрат, на которую не влияет размер кабеля, у.д.е./м;

l — длина кабеля, м.

Тогда экономичный размер жилы S_{ec}, $мм^2$, может быть получен приравниванием к нулю производной уравнения (14) по отношению к S:

$$S_{ec} = 1000 \left[\frac{I_{max}^2 F \rho_{20} B[1 + \alpha_{20}(\theta_m - 20)]}{A} \right]^{0,5}. \tag{18}$$

Примечания

1 Так как значение экономичного размера жилы S_{ec} неизвестно, необходимо сделать предположительную оценку возможного размера кабеля для вычисления приемлемых значений y_p, y_s, λ_1, λ_2. Повторные вычисления могут потребоваться в случае, если полученный экономичный размер значительно отличается от реального.

2 Постоянная составляющая затрат C в уравнении (17) не влияет на оценку экономичного размера жилы S_{ec}.

Маловероятно, что экономичный размер жилы S_{ec} будет равен стандартному размеру (см. МЭК 60228), и поэтому следует рассчитать стоимость ближайших к нему большего и меньшего стандартных размеров и выбрать из них наиболее экономичный.

5.2.3 Диэлектрические потери

Диэлектрические потери в кабелях некоторых типов могут быть значительными (см. таблицу 3 МЭК 60287-1-1). Для таких кабелей следует учитывать диэлектрические потери при выборе жилы с наиболее экономичным сечением. Диэлектрические потери рассчитывают с использованием формул, приведенных в МЭК 60287-1-1.

Для определенных уровня напряжения и толщины изоляции увеличение диаметра жилы приводит к увеличению емкости кабеля и, как результат этого, к увеличению потерь, зависящих от напряжения. Вследствие этого, если диэлектрические потери включены в анализ, эти потери могут повлиять на выбор жилы в сторону меньшего размера, противоположно влиянию эффекта потерь, зависящих от тока.

При учете диэлектрических потерь установленные стоимости CI, CI_1 и CI_2 должны включать в себя общие затраты на диэлектрические потери в течение срока эксплуатации.

Так как аналитическое выражение для расчета оптимального сечения жилы, включающее в себя эффект диэлектрических потерь, было бы сложным, следует использовать следующую процедуру. Сначала из уравнения (18) получают экономичный размер жилы без учета диэлектрических потерь. Затем рассчитывают стоимость данного размера и двух ближайших меньших стандартных размеров, включая затраты на диэлектрические потери, и выбирают наиболее экономичный размер.

(Пункт 5.2.3 введен дополнительно, Изм. № 1).

Приложение А
(справочное)

Примеры расчета экономичных размеров жил

А.1 Общие положения

Примеры вычислений приведены для системы энергоснабжения, питающей 10 одинаковых нагрузок, одинаковым образом расположенных вдоль кабельной линии для следующих случаев:

a) с применением первого подхода (см. 5.1) — метод диапазона экономичного тока для определения размера каждого кабеля между соседними нагрузками;

b) с применением второго метода (см. 5.2) — метод экономичного размера жилы для определения размера каждого кабеля между соседними нагрузками;

c) с применением обоих методов для выявления наиболее экономичного размера жилы, если используется только один размер кабеля по всей трассе.

Результаты, приведенные в А.6, показывают, что экономия средств может быть достигнута прежде всего за счет выбора размера жилы, приводящего к уменьшению общих затрат, а не только за счет минимизации первоначальных затрат.

А.2 Информация о кабеле и системе энергоснабжения

Параметры нагрузки и трассы кабеля

Трасса кабеля напряжением 10 кВ спроектирована так, чтобы 10 подстанций напряжением 10 кВ/0,4 кВ располагались на равных расстояниях вдоль трассы кабеля от станции напряжением 150 кВ/10 кВ (см. рисунок А.1, где представлена только одна трехфазная цепь, поэтому $N_c = 1$ и $N_p = 3$).

Длина кабеля между подстанциями — 500 м.

Наибольшее ежечасное среднее значение силы тока I_{max} в первый год для каждой секции трассы кабеля:

Секция	Сила тока, А
1	160
2	144
3	128

Сила тока уменьшается на 16 А на каждой подстанции до:

9	32
10	16

Коэффициент циклической нагрузки M для всех нагрузок равен 1,11 (см. МЭК 60853). Предполагают, что этот коэффициент остается постоянным в течение экономического срока эксплуатации кабеля.

Для каждой секции трассы размер кабеля выбирают согласно следующим критериям:

a) Минимизированная сумма первоначальных затрат плюс настоящее значение джоулевых потерь для экономического срока эксплуатации кабеля.

b) Пропускная способность по току, требуемая для нагрузки в течение последнего года срока эксплуатации кабеля. Требуемая пропускная способность по току для данного примера — 0,9 максимальной нагрузки, т. е. пропускная способность — это максимальная нагрузка, деленная на коэффициент циклической нагрузки, равный 1,11.

c) Другие факторы, такие как допустимый ток короткого замыкания и падение напряжения, в данном примере не рассматриваются, но могут учитываться в соответствии с пунктом 0.3 введения.

Финансовые данные:

- экономический срок эксплуатации N...30 лет;
- время эксплуатации при максимальных потерях T...2 250 ч/год (значение 2 250 включает в себя эффект влияния ежедневной циклической нагрузки);
- цена джоулевых потерь в конце первого года при напряжении 10 кВ
P...60,9 · 10^{-6} у.д.е./Вт · ч;
- ежегодный требуемый платеж D...0,003 у.д.е./Вт · год;
- затраты на кабель и его монтаж на единицу длины, приведенные в таблице А.1, у.д.е./м:
- для данного примера коэффициент затрат на прокладку кабеля той части, которая зависит от рассчитанного размера жилы, A...0,1133 у.д.е./м · $мм^2$,
- ежегодное увеличение нагрузки a...0,5 %,
- ежегодное увеличение стоимости электроэнергии (цена за кВт · ч) b...2,0 %,
- ежегодная дисконтная ставка i...5,0 %.

Параметры кабеля:

Для данного примера взят вымышленный трехжильный кабель на напряжение 6/10 кВ. Сопротивление жил переменному току при температуре 40 °С и 80 °С и финансовые данные приведены в таблице А.1. Кабель имеет максимально допустимую температуру жилы 80 °С и для кабеля, проложенного в земле, номинальные характеристики в установившемся режиме при температуре окружающей среды 20 °С приведены в А.3.3.

Вычисления вспомогательных величин:

$$r = \frac{[1+(0{,}5/100)]^2[1+(2/100)]}{1+(5/100)} = 0{,}98117, \qquad \text{[(см. (9)]}$$

$$Q = \frac{1-0{,}9812^{30}}{1-0{,}9812} = 23{,}081, \qquad \text{[(см. (8)]}$$

$$F = \frac{3\cdot 1(2250\cdot 60{,}9\cdot 10^{-6}+0{,}003)23{,}08}{1+(5/100)} = 9{,}2341. \qquad \text{[(см. (10)]}$$

А.3 Расчет с использованием метода диапазона экономичного тока (см. 5.1)

А.3.1 Расчет диапазона экономичного тока для жилы одного размера

В качестве примера будет рассчитан диапазон экономичного тока для жилы сечением 240 мм^2, используя уравнения (12) и (13):

- нижний предел $I_{max} = \sqrt{\frac{500(52{,}2-45{,}96)10^3}{9{,}2341\cdot 500(0{,}184-0{,}140)}} = 128$ А; [(см. (12)]

- верхний предел $I_{max} = \sqrt{\frac{500(58{,}99-52{,}2)10^3}{9{,}2341\cdot 500(0{,}140-0{,}114)}} = 168$ А. [(см. (13)]

Верхние пределы тока для диапазона стандартных размеров жил, если кабель проложен, как указано в данном примере, были также определены. Т. к. нижняя граница значения тока для данного размера жилы является также верхней границей для жилы следующего меньшего размера, то рассчитанные значения могут быть выражены в виде диапазона токов, как показано ниже.

Диапазоны экономичных токов для размеров от 25 до 400 мм^2

Номинальный размер, мм^2	Диапазон тока, А	
25	—	19
35	19	27
50	27	34
70	34	48
95	48	66
120	66	85
150	85	98
185	98	128
240	128	168
300	168	231
400	231	—

Соотношения между максимальной нагрузкой на кабель в течение первого года и общей стоимостью единицы длины для трех размеров кабеля приведены на рисунке А.2. Очевидно, что каждый размер кабеля обеспечивает наиболее экономичную прокладку кабеля для диапазона значений тока.

Влияние изменения размера жилы на общие затраты при заданной нагрузке показано на рисунке А.3. Параметры кабеля и финансовые параметры для данного примера были сохранены, но фиксированная нагрузка I_{max} в 100 А была взята произвольно. Очевидно, что в области наиболее экономичного размера кабеля выбор размера кабеля не сильно влияет на общие затраты. Однако снижение затрат по сравнению со снижением затрат, связанных с использованием размера кабеля, выбранного по температурным соображениям, очень значительно.

А.3.2 Выбор экономичного размера жилы для каждой секции трассы кабеля

Из экономичных диапазонов токов, указанных в А.3.1, выбирают подходящий размер жилы для каждой секции трассы кабеля, основываясь на значениях I_{max} для первого года эксплуатации. Выбранные таким образом размеры для каждой секции трассы кабеля приведены в таблице А.2 вместе с затратами, вычисленными по (11).

Типичный пример вычисления стоимости приведен ниже.

Для секции 1, I_{max} — 160 А.

Экономичный размер жилы, выбранный по А.3.1, равен 240 мм^2 и имеет диапазон экономичного тока от 128 до 168 А.

$$CT = [52{,}2\cdot 500] + [160^2(0{,}140/1000)\,500\cdot 9{,}2341] = 26100 + 16548 = 42648 \text{ у.д.е.}$$

Затраты на каждую секцию трассы кабеля приведены в таблице А.2.

Из таблицы А.2 следует, что общие расходы на проложенный кабель, исходя из выбора экономичного решения, по истечении 30 лет равны 290 535 у.д.е.

А.3.3 Размер жилы, основанный на максимальной нагрузке. Выбор, основанный на расчетной тепловой мощности

Размер жилы для каждой секции выбирают так, чтобы обеспечить работоспособность при ожидаемой максимальной нагрузке в течение последнего года экономического срока эксплуатации без превышения максимально допустимой температуры жилы.

Для первой секции:

I_{max} (первый год) = 160 А.

Максимальное значение тока в последний год = $160\,[1 + (0{,}5/100)]^{30-1}$;

$= 160 \cdot 1{,}1556$;

$= 185$ А.

Требуемая допустимая токовая нагрузка I (100 %-ный коэффициент нагрузки) для последнего года не должен быть менее чем

$$185/1{,}11 = 167 \text{ А},$$

где число 1,11 — коэффициент циклической нагрузки по А.2, перечисление b).

По ниже приведенным значениям токовой нагрузки (вычисленным методами по МЭК 60287-1-1 и МЭК 60287-2-1 для данного типа кабеля после прокладки в земле) определяют требуемый размер жилы — 70 мм^2.

Номинальный размер, мм^2	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300	400
Токовая нагрузка, А	103	125	147	181	221	255	281	328	382	429	482

Для проведения объективного сравнения с потерями и финансовыми параметрами, вычисленными для выбора экономичного размера жилы, необходимо указать температуру жилы, при которой вычисляют затраты. Для экономичного выбора делаем предположение, что температура жилы должна быть около 40 °С (см. раздел 4). Полагалось, что максимально допустимое значение сравниваемой предположительной максимально допустимой температуры жил, выбранной на основе тепловой мощности, равно 80 °С.

Сопротивление жилы при температуре 80 °С приведено в таблице А.1.

Общая стоимость жилы для первой секции трассы кабеля в течение 30-летнего периода получена из уравнения (11).

$CT = [32{,}95 \cdot 500] + [160^2(0{,}553/1000)\ 500 \cdot 9{,}2341] = 16475 + 65363 = 81838$ у.д.е.

Сравнение со стоимостью первой секции трассы кабеля при использовании экономичного размера жилы, оцененного в А.3.2, показывает, что сокращение затрат для данной секции составляет (81838 – 42648) 100/81838 = = 48 %.

Аналогичные расчеты с использованием размеров, основанных на максимально допустимой тепловой токовой нагрузке, выполнены для всех секций и приведены в таблице А.3. Общая экономия для 10 секций составляет (547864 – 290535)100/547864 = 47 %.

А.4 Расчеты с использованием метода экономичного размера жилы (см. 5.2)

Первая секция трассы кабеля используется в качестве примера:

I_{max} = 160 А;

ρ_{20} = $30{,}3 \cdot 10^{-9}$ Ом · м (см. 5.2.1);

α_{20} = 0,00403 K^{-1};

B = 1,023 (первоначально предполагалось, что размер жилы 185 мм^2 может быть экономически оптимальным);

A = 0,1133 у.д.е./м · мм^2 (коэффициент переменной части затрат на прокладку кабеля, см. 5.2.2);

F = 9,2341 у.д.е./м;

θ_m = (80 – 20)/3 + 20 = 40 °С;

$$S_{ec} = 1000\left[\frac{160^2 \cdot 9{,}2341 \cdot 30{,}3 \cdot 10^{-9} \cdot 1{,}023[1 + 0{,}00403(40 - 20)]}{0{,}1133}\right]^{0{,}5} = 264 \text{ мм}^2.$$

Таким образом, можно выбрать жилу сечением 240 или 300 мм^2.

Первоначальный выбор жилы сечением 185 мм^2 со значением B теперь может быть улучшен.

Повторные вычисления со значением $B = 1{,}057$ для сечения 300 мм^2 дают для S_{ec} значение 269 мм^2, также в диапазоне от 240 до 300 мм^2.

Общую стоимость кабеля каждого возможного размера вычисляют по (11):

$CT_{240} = [52{,}2 \cdot 500] + [160^2\ (0{,}140/1\ 000)500 \cdot 9{,}2341] = 26100 + 16548 = 42648$ у.д.е.;

$CT_{300} = [58{,}99 \cdot 500] + [160^2(0{,}114/1000)500 \cdot 9{,}2341] = 29495 + 13474 = 42969$ у.д.е.

Следовательно, сечение жилы 240 мм^2 является более экономичным.

Размеры и затраты на другие секции трассы кабеля вычисляют аналогично. Значения согласовывают со значениями, полученными предыдущим методом, в соответствии с А.3.1 и А.3.2, и итоговые значения размеров и затрат должны быть аналогичными приведенным в таблице А.2.

А.5 Расчеты, основанные на использовании жилы стандартного размера для всех секций трассы кабеля

А.5.1 Использование метода диапазона экономичного тока

Вначале предполагают возможный размер жилы и общую стоимость рассчитывают по (11), используя этот размер для всех секций трассы кабеля. Затем рассчитывают затраты с использованием кабелей следующих бóльших и меньших размеров для того, чтобы подтвердить, что выбранный размер действительно наиболее экономичен.

С этой целью в настоящем примере предполагают, что жила сечением 185 мм^2 является лучшим выбором.

Стоимость всех секций трассы кабеля с жилами сечением 185 мм^2, а также 150 и 240 мм^2, была рассчитана и приведена в таблице А.4.

Общие стоимости:

150 мм^2 ..... 312841 у.д.е.;

185 мм^2 ..... 312166 у.д.е.;

240 мм^2 ..... 324707 у.д.е.

Это указывает на то, что если в целях унификации может использоваться жила только одного размера, то жила размером 185 мм^2 — наиболее экономичный выбор.

Следовательно, в данном случае могут иметь место небольшие изменения общей стоимости, связанные с изменением размера жилы и указанные в А.3.1 и на рисунке А.3.

А.5.2 Метод экономичного размера жилы

Хотя используется жила только одного размера и различная сила тока в каждой секции кабеля, можно рассчитать средние потери (предполагается, что все секции функционируют при одинаковой температуре и, следовательно, имеют одинаковое электрическое сопротивление жилы):

$$\frac{\text{Средние потери}}{\text{Максимальные потери}} = \frac{500 \cdot 160^2 + 500 \cdot 144^2 + \ldots + \ldots + 500 \cdot 16^2}{10 \cdot 500 \cdot 160^2} = 0{,}385.$$

Из уравнения (18), используя значение B для жилы сечением 185 мм^2, получаем:

$$S_{ec} = 1000 \left[\frac{160^2 \cdot 1{,}023 \cdot 30{,}3 \cdot 10^{-9} [1 + 0{,}00403(40 - 20)] 9{,}2341 \cdot 0{,}385}{0{,}1133} \right]^{0{,}5} = 164 \text{ мм}^2.$$

Поэтому жилы сечением 150 или 185 мм^2 могут оказаться наиболее экономичными.

Общая стоимость для каждой из этих жил:

$CT_{150} = 42{,}00 \cdot 500 \cdot 10 + 160^2(0{,}226/1000)500 \cdot 10 \cdot 9{,}2341 \cdot 0{,}385 = 210000 + 102843 = 312843$ у.д.е.;

$CT_{185} = 45{,}96 \cdot 500 \cdot 10 + 160^2(0{,}181/1000)500 \cdot 10 \cdot 9{,}2341 \cdot 0{,}385 = 229800 + 82365 = 312165$ у.д.е.

Таким образом подтверждено, что жила сечением 185 мм^2 наиболее экономична для использования, если по всей трассе кабеля использовать жилу одного размера.

После сравнения с размерами, выбранными по таблице А.3, очевидно, что жила сечением 185 мм^2 соответствует требованиям к температуре и способна обеспечить максимальную нагрузку по окончании 30-летнего периода.

А.6 Обобщение результатов

Обобщенные результаты расчетов для выбранного кабеля в условиях, описанных в А.2, приведены ниже.

Суммарные расходы				
Основные составляющие расходов	*CI*, у.д.е.	*CJ*, у.д.е.	Всего	
			у.д.е.	%
Допустимая тепловая токовая нагрузка для каждой секции	146330	401534	547864	100
Экономичный размер для каждой секции	202095	88440	290535	53
Экономичный размер при использовании стандартного сечения жилы 185 мм^2 по всей трассе кабеля	229800	82365	312165	57

Т а б л и ц а А.1 — Параметры кабеля

Размер кабеля, мм^2	Фазовое электрическое сопротивление при		Первоначальная стоимость		
	40 °С, Ом/км	80 °С, Ом/км	Кабель, у.д.е./м	Прокладка, у.д.е./м	Всего, у.д.е./м
25	1,298	1,491	10,62	17,23	27,85
35	0,939	1,079	11,65	17,33	28,98
50	0,694	0,798	13,19	17,49	30,68
70	0,481	0,553	15,24	17,71	32,95
95	0,348	0,400	17,81	17,97	35,78
120	0,277	0,318	20,37	18,24	38,61
150	0,226	0,259	23,45	18,55	42,00
185	0,181	0,208	27,04	18,92	45,96
240	0,140	0,161	32,69	19,51	52,20
300	0,114	0,131	38,85	20,14	58,99
400	0,091	0,104	49,11	21,20	70,31

Т а б л и ц а А.2 — Экономичная нагрузка

Номер секции	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Нагрузка											
I_{max}, А	160	144	128	112	96	80	64	48	32	16	
Кабель											
Размер, мм^2	240	240	185	185	150	120	95	70	50	25	
Нагрузка, А	382	382	328	328	281	255	221	181	147	103	
Затраты на секцию и общие затраты											Всего
Кабель, у.д.е.	16345	16345	13520	13520	11725	10185	8905	7620	6595	5310	110070
Прокладка, у.д.е.	9755	9755	9460	9460	9275	9120	8985	8855	8745	8615	92025
CI, у.д.е.	26100	26100	22980	22980	21000	19305	17890	16475	15340	13925	202095
CJ, у.д.е.	16548	13403	13692	10483	9616	8185	6581	5117	3281	1534	88440
CT, у.д.е.	42648	39503	36672	33463	30616	27490	24471	21592	18621	15459	290535

Т а б л и ц а А.3 — Критерий допустимой токовой нагрузки

Номер секции	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Нагрузка											
I_{max}, А	160	144	128	112	96	80	64	48	32	16	
I_{end}, А	185	166	148	129	111	92	74	55	37	18	
I_{end} /1,11, А	167	150	133	117	100	83	67	50	33	17	
Кабель											
Размер, мм^2	70	70	50	35	25	25	25	25	25	25	
Нагрузка, А	181	181	147	125	103	103	103	103	103	103	
Затраты на секцию и общие затраты											Всего
Кабель, у.д.е.	7620	7620	6595	5825	5310	5310	5310	5310	5310	5310	59520
Прокладка, у.д.е.	8855	8855	8745	8665	8615	8615	8615	8615	8615	8615	86810
CI, у.д.е.	16475	16475	15340	14490	13925	13925	13925	13925	13925	13925	146330
CJ, у.д.е.	65363	52944	60365	62492	63443	44058	28197	15861	7049	1762	401534
CT, у.д.е.	81838	69419	75705	76982	77368	57983	42122	29786	20974	15687	547864

Т а б л и ц а А.4 — Экономичная нагрузка, стандартный размер жилы для всех секций

Стандартный размер 150 мм^2

Номер секции	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Нагрузка											
I_{max}, А	160	144	128	112	96	80	64	48	32	16	
Кабель											
Размер, мм^2	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	
Нагрузка, А	281	281	281	281	281	281	281	281	281	281	
Затраты на секцию и общие затраты											Всего
Кабель, у.д.е.	11725	11725	11725	11725	11725	11725	11725	11725	11725	11725	117250
Прокладка, у.д.е.	9275	9275	9275	9275	9275	9275	9275	9275	9275	9275	92750
CI, у.д.е.	21000	21000	21000	21000	21000	21000	21000	21000	21000	21000	210000
CJ, у.д.е.	26712	21637	17096	13089	9616	6678	4274	2404	1068	267	102841
CT, у.д.е.	47712	42637	38096	34089	30616	27678	25274	23404	22068	21267	312841

Стандартный размер 185 мм^2

Номер секции	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Нагрузка											
I_{max}, А	160	144	128	112	96	80	64	48	32	16	
Кабель											
Размер, мм^2	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	
Нагрузка, А	328	328	328	328	328	328	328	328	328	328	
Затраты на секцию и общие затраты											Всего
Кабель, у.д.е.	13520	13520	13520	13520	13520	13520	13520	13520	13520	13520	135200
Прокладка, у.д.е.	9460	9460	9460	9460	9460	9460	9460	9460	9460	9460	94600
CI, у.д.е.	22980	22980	22980	22980	22980	22980	22980	22980	22980	22980	229800
CJ, у.д.е.	21393	17329	13692	10483	7702	5348	3423	1925	856	214	82365
CT, у.д.е.	44373	40309	36672	33463	30682	28328	26403	24905	23836	23194	312165

Стандартный размер 240 мм^2

Номер секции	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Нагрузка											
I_{max}, А	160	144	128	112	96	80	64	48	32	16	
Кабель											
Размер, мм^2	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	
Нагрузка, А	382	382	382	382	382	382	382	382	382	382	
Затраты на секцию и общие затраты											Всего
Кабель, у.д.е.	16345	16345	16345	16345	16345	16345	16345	16345	16345	16345	163450
Прокладка, у.д.е.	9755	9755	9755	9755	9755	9755	9755	9755	9755	9755	97550
CI, у.д.е.	26100	26100	26100	26100	26100	26100	26100	26100	26100	26100	261000
CJ, у.д.е.	16548	13 403	10590	8108	5957	4137	2648	1489	662	165	63707
CT, у.д.е.	42648	39503	36690	34208	32057	30237	28748	27589	26762	26265	324707

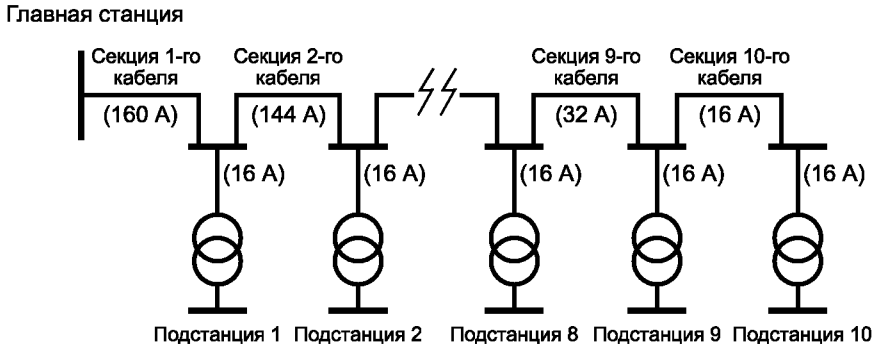

Рисунок А.1 — Схема кабельной системы

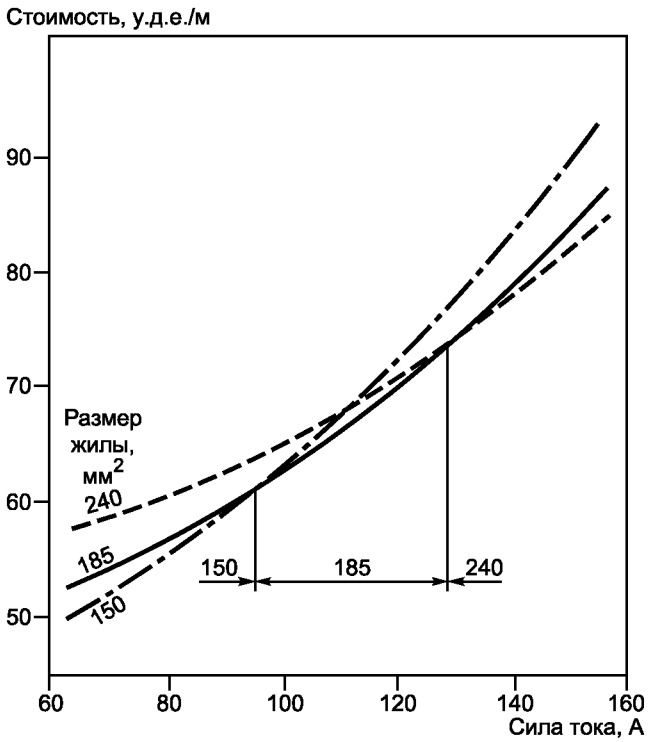

Рисунок А.2 — Диапазоны экономичных токов

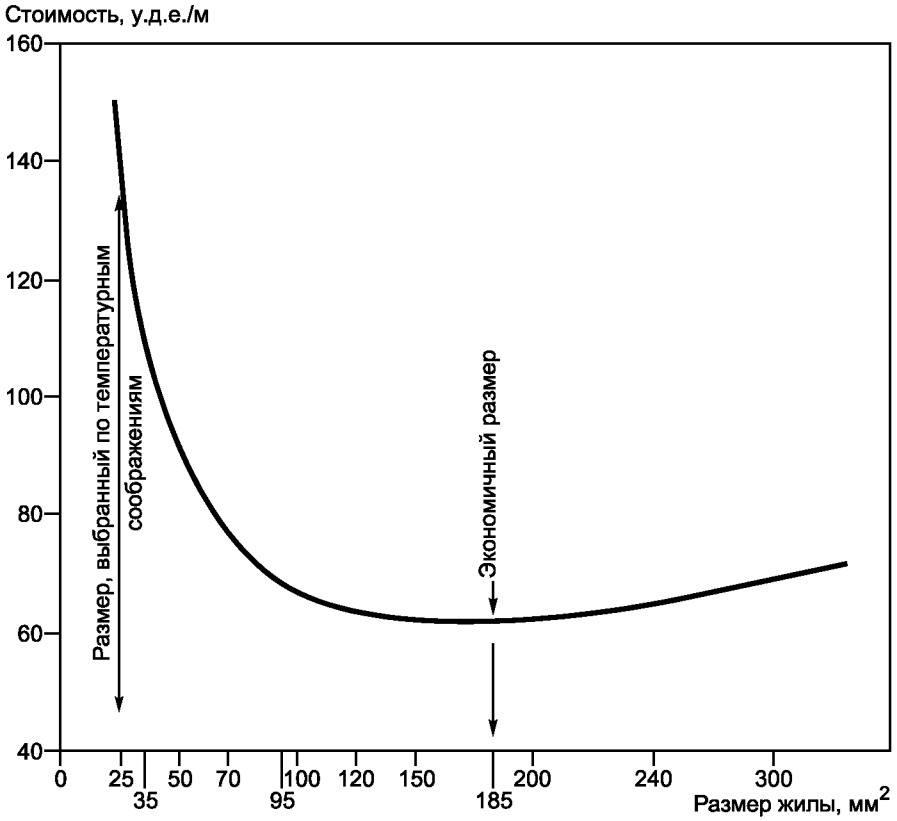

Рисунок А.3 — Изменение стоимости в зависимости от размера жилы

Приложение В
(справочное)

Средние значения температуры и электрического сопротивления жилы

В.1 Методы оценки среднего значения температуры и электрического сопротивления жилы

Для удобства расчетов и (обычно) с достаточной точностью допускают, что сопротивление жилы есть величина постоянная в течение срока эксплуатации кабеля. Простая формула для оценки рабочей температуры жилы и, следовательно, ее сопротивления приведена в разделе 4. Эта формула основана на результатах типичных вычислений, показывающих, что рост средней рабочей температуры жилы экономичного размера, рассматриваемый в пределах экономического срока службы, находится в пределах одной трети роста температуры при максимально допустимой токовой нагрузке.

Для примера, приведенного в настоящем стандарте, ошибки при определении размера жилы и общих затрат как результат использования этой оценки, принимают не более 2 %. Однако более существенные ошибки могут быть там, где комбинация затрат на монтаж, затрат на потери в кабеле и роста нагрузки ведет к тому, что температура жилы приближается к максимально допустимым значениям в последние годы срока эксплуатации.

В общем случае более точное значение сопротивления жилы способно повлиять на выбор экономичного размера только в крайних случаях. Возможны ситуации, при которых потребуется бóльшая точность при оценке затрат на потери электроэнергии, для достижения которой могут быть предприняты дополнительные усилия.

Если для особых случаев требуется бóльшая точность, то могут быть получены уточненные значения температуры и сопротивления жилы с использованием в качестве точки отсчета размера жилы или диапазона экономичных токов, полученных посредством простой оценки температуры, в соответствии с разделом 4.

В.2 Формулы для определения средних значений температуры и электрического сопротивления жилы

Температура жилы θ_m, °С, как средняя величина от значений температуры жилы в первый и последний год срока службы, может быть получена из формулы

$$\theta_m = \frac{\theta_s + \theta_f}{2} = \frac{\beta + \theta_a}{2}\left[\frac{1}{1-\gamma} + \frac{1}{1-g\gamma}\right] - \beta, \tag{19}$$

где θ_s — температура жилы в течение первого года, °С;

θ_f — температура жилы в течение последнего года, °С;

θ_a — температура окружающей среды, °С;

β — обратная величина температурного коэффициента сопротивления материала жилы, К.

Для алюминия β = 228, для меди β = 234,4.

$$\gamma = \left[\frac{I_{max}}{I_z}\right]^2 \left[\frac{\theta - \theta_a}{\beta + \theta}\right], \tag{20}$$

где I_{max} — значение тока нагрузки в течение первого года, А;

I_z — допустимая токовая нагрузка для максимально допустимого повышения температуры $\theta - \theta_a$ по МЭК 60287-1 и 60287-2, А;

θ — максимально допустимая температура жилы, °С;

g — $(1 + a/100)^{2(N-1)}$;

a — ежегодное увеличение I_{max}, %;

N — длительность экономического периода, годы.

Среднее значение сопротивления жилы R_m, Ом/м, как среднее в течение первого и последнего годов

$$R_m = \frac{R_{20}}{2}\left(\frac{\beta + \theta_a}{\beta + 20}\right)\left(\frac{1}{1-\gamma} + \frac{1}{1-g\gamma}\right). \tag{21}$$

Значение R_m может быть непосредственно подставлено в уравнения (11), (12) и (13).

Аналогично, следующее уравнение может быть использовано для получения значения ρ_m, Ом · м , которое может быть подставлено вместо $\rho_{20}[1 + \alpha_{20}(\theta_m - 20)]$ в уравнения (15) и (18):

$$\rho_m = \frac{\rho_{20}}{2}\left(\frac{\beta + \theta_a}{\beta + 20}\right)\left(\frac{1}{1-\gamma} + \frac{1}{1-g\gamma}\right). \tag{22}$$

B.3 Определение экономичного диапазона тока (см. 5.1)

Это определение основано на примере из А.3 приложения А.

Рассматривают диапазон силы тока, рассчитанный для жилы сечением 240 мм^2, значения $I(1)$ и $I(2)$ — нижнюю и верхнюю границы этого диапазона рассчитывают посредством простой оценки температуры жилы. В настоящем примере $I(1)$ = 128 А и $I(2)$ = 168 А.

Для указанных в таблице трех размеров жилы необходимы следующие данные:

Размер, мм^2	R_{20}, Ом/км	CI, у.д.е./м	I_z*, А	$I_{max.z} = I_z \cdot M$**, А
185	0,1675	45,96	328	364
240	0,1296	52,20	382	424
300	0,1053	58,99	429	476

* См. А.3.3 приложения А.
** Коэффициент циклической нагрузки M = 1,11, см. А.2 приложения А.

F = 9,2341 (см. А.2).

Ниже приведен порядок повторной оценки рабочей температуры и сопротивления жилы для верхней границы диапазона силы тока для жилы сечением 240 мм^2.

Расчет вспомогательной величины γ из выражения

$$\gamma(240) = \left(\frac{168}{424}\right)^2 \left(\frac{80-20}{228+80}\right) = 0{,}03058, \qquad \text{[(см. (20)]}$$

где значение 168 А было получено из первоначальных расчетов по А.3, используя простую оценку θ_m.

Увеличение потери мощности вследствие роста нагрузки:

$$g = [1 + (a/100)]^{2(N-1)} = 1{,}3355,$$

следовательно, $g\gamma$ (240) = 1,3355 · 0,03058 = 0,04084.

Тогда уточненную оценку сопротивления жилы сечением 240 мм^2 получают из выражения:

$$R_m(240) = \left(\frac{0{,}1293}{2}\right)\left(\frac{228+20}{228+20}\right)\left(\frac{1}{1-0{,}03058} + \frac{1}{1-0{,}04084}\right) = 0{,}1344 \text{ Ом/км}. \qquad \text{[(см. (21)]}$$

Аналогично, для жилы сечением 300 мм^2:

$$\gamma(300) = \left(\frac{168}{476}\right)^2 \left(\frac{80-20}{228+80}\right) = 0{,}02427 \text{ и } g\gamma(300) = 1{,}3355 \cdot 0{,}02427 = 0{,}03241, \qquad \text{[(см. (20)]}$$

тогда

$$R_m(300) = \left(\frac{0{,}1053}{2}\right)\left(\frac{228+20}{228+20}\right)\left(\frac{1}{1-0{,}02427} + \frac{1}{1-0{,}03241}\right) = 0{,}1084 \text{ Ом/км}. \qquad \text{[(см. (21)]}$$

Уточненный верхний предел диапазона силы тока равен

$$I(2) = \sqrt{\frac{500(58{,}99-52{,}20)1000}{9{,}2341 \cdot 500(0{,}1344-0{,}1084)}} = 168 \text{ А}. \qquad \text{[(см. (12)]}$$

Отличие от первоначального значения этой величины тока 168 А находится в пределах допустимой погрешности вследствие округления и поправки практически на одно и то же значение температуры обеих жил. Полученное значение величины тока не влияет на выбор жилы сечением 240 мм^2 для максимальной токовой нагрузки 160 А для первой секции трассы кабеля.

Аналогичные вычисления могут быть проведены для нижней границы диапазона силы тока.

Общая стоимость кабеля CT, полученная при первоначальных расчетах, равнялась 42648 у.д.е. (см. А.3.2); теперь можно определить стоимость, основанную на уточненном значении сопротивления для жилы сечением 240 мм^2.

При значении максимального тока нагрузки I_{max} = 160 А вспомогательная величина γ равна:

$$\gamma(240) = \left(\frac{160}{424}\right)^2 \left(\frac{80-20}{228+80}\right) = 0{,}02774; \qquad \text{[(см. (20)]}$$

$$g\gamma(240) = 1{,}3355 \cdot 0{,}02774 = 0{,}03705.$$

Отсюда получаем:

$$R_m(240) = \left(\frac{0{,}1296}{2}\right)\left(\frac{228+20}{228+20}\right)\left(\frac{1}{1-0{,}02774}+\frac{1}{1-0{,}03705}\right) = 0{,}1339 \text{ Ом/км.} \quad \text{[(см. (21)]}$$

$$CT = 52{,}2 \cdot 500 + 160^2 \frac{0{,}1339}{1000} 9{,}2341 \cdot 500 = 2600 + 15827 = 41927 \text{ у.д.е.} \quad \text{[(см. (11)]}$$

В сравнении с суммой 42 648 у.д.е., полученной для данного примера путем более простой процедуры, видно, что произошло уменьшение затрат менее чем на 2 %.

B.4 Определение экономичного размера жилы (см. 5.2)

Числовые значения для данного раздела взяты из примера в А.4.

Пример в А.4 после уточнения коэффициента *B* для электрического сопротивления переменному току показывает, что наиболее экономичное значение сечения жилы равно 269 мм^2, что ближе к стандартному размеру 240 мм^2, чем к размеру 300 мм^2.

Допускается проведение повторной оценки этого размера с уточнением электрического сопротивления жилы. Соответствующие данные для жилы сечением 240 мм^2 приведены в В.2. Расчетная нагрузка — 160 А:

$$\gamma(240) = \left(\frac{160}{424}\right)^2\left(\frac{80-20}{228+80}\right) = 0{,}02774; \quad \text{[(см. (20)]}$$

$$g\gamma(240) = 1{,}3355 \cdot 0{,}02774 = 0{,}03705.$$

Ниже приведен расчет удельного электрического сопротивления, уточненного с учетом температуры:

$$\rho_m = \frac{30{,}3 \cdot 10^{-9}}{2}\left(\frac{228+20}{228+20}\right)\left(\frac{1}{1-0{,}02774}+\frac{1}{1-0{,}03705}\right) = 30{,}3 \cdot 10^{-9} \cdot 1{,}0335 = 31{,}32 \cdot 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad \text{[(см. (22)]}$$

и наиболее экономичного размера:

$$S_{ec} = 1000\left[\frac{160^2 \cdot 9{,}2341 \cdot 31{,}32 \cdot 10^{-9} \cdot 1{,}057}{0{,}1133}\right]^{0{,}5} = 263 \text{ мм}^2. \quad \text{[(см. (18)]}$$

Незначительное изменение размера S_{ec} делает его значение немного ближе к стандартному размеру 240 мм^2.

Общая стоимость кабеля с жилой сечением 240 мм^2 будет той же, что и рассчитанная в В.2.

Средняя температура жилы сечением 240 мм^2 в течение срока эксплуатации θ_m равна:

$$\theta_m = \left(\frac{228+20}{2}\right)\left(\frac{1}{1-0{,}02774}+\frac{1}{1-0{,}03705}\right) - 228 = 28{,}3 \text{ °C.} \quad \text{[(см. (19)]}$$

Приложение ДА
(справочное)

Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов национальным стандартам Российской Федерации и действующим в этом качестве межгосударственным стандартам

Таблица ДА.1

Обозначение ссылочного международного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование соответствующего национального стандарта
МЭК 60228:1978	MOD	ГОСТ 22483—77 «Жилы токопроводящие медные и алюминиевые для кабелей, проводов и шнуров. Основные параметры. Технические требования»
МЭК 60287-1-1:1994	IDT	ГОСТ Р МЭК 60287-1-1—2009 «Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 1-1. Уравнения для расчета номинальной токовой нагрузки (100 %-ный коэффициент нагрузки) и расчет потерь. Общие положения»
МЭК 60287-2-1:1994	IDT	ГОСТ Р МЭК 60287-2-1—2009 «Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 2-1. Тепловое сопротивление. Расчет теплового сопротивления»
МЭК 60853	—	*

* Соответствующий национальный стандарт отсутствует. До его утверждения рекомендуется использовать перевод на русский язык данного международного стандарта. Перевод данного международного стандарта находится в ОАО «ВНИИКП».

Примечание — В настоящей таблице использованы следующие условные обозначения степени соответствия стандартов:

- IDT — идентичные стандарты;
- MOD — модифицированные стандарты.

УДК 621.315.326.001.4:006.354 ОКС 29.060.20 Е49 ОКП 35 0000

Ключевые слова: электрический кабель, токовые нагрузки, экономичный размер жилы

Редактор *В.Н. Копысов*
Технический редактор *Н.С. Гришанова*
Корректор *Ю.М. Прокофьева*
Компьютерная верстка *Л.А. Круговой*

Сдано в набор 22.02.2012. Подписано в печать 09.04.2012. Формат 60 × 84 1/8. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 3,26. Уч.-изд. л. 2,70. Тираж 121 экз. Зак. 283.

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