ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р МЭК 60287-1-1— 2022

Кабели электрические

РАСЧЕТ НОМИНАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ НАГРУЗКИ

Часть 1-1

Методы расчета номинальной токовой нагрузки (100 %-ный коэффициент нагрузки) и потерь. Общие положения

(IEC 60287-1-1:2014, Electric cables — Calculation of the current rating — Part 1-1. Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses — General, IDT)

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2022

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 ПОДГОТОВЛЕН Открытым акционерным обществом «Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности» (ОАО «ВНИИКП») на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии стандарта, указанного в пункте 4

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 046 «Кабельные изделия»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 26 мая 2022 г. № 399-ст

4 Настоящий стандарт идентичен международному стандарту МЭК 60287-1-1:2014 «Электрические кабели. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 1-1. Уравнения для расчета номинальной токовой нагрузки (100 %-ный коэффициент нагрузки) и расчет потерь. Общие положения» (IEC 60287-1-1:2014 «Electric cables — Calculation of the current rating — Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses — General», IDT).

Наименование настоящего стандарта изменено относительно наименования указанного международного стандарта для приведения в соответствие с ГОСТ Р 1.5—2012 (пункт 3.5).

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

5 ВЗАМЕН ГОСТ Р МЭК 60287-1-1—2009

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «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 (*gost.e-ecolog.ru

© IEC, 2014
© Оформление. ФГБУ «РСТ», 2022

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 Общие положения 1
1.1 Область применения 1
1.2 Нормативные ссылки 1
1.3 Обозначения 2
1.4 Расчет номинальной токовой нагрузки кабелей. 5
2 Расчет потерь 8
2.1 Сопротивление жилы кабеля переменному току. 8
2.2 Диэлектрические потери для кабелей на переменное напряжение. 11
2.3 Коэффициент потерь в оболочке и экране для кабелей на переменное напряжение промышленной частоты 12
2.4 Коэффициент потерь для брони, защитного усиливающего покрытия и стальных труб для кабелей на переменное напряжение промышленной частоты. 19
Приложение ДА (справочное) Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов национальным и межгосударственным стандартам 24

Введение

Настоящий стандарт является частью 1-1 серии стандартов МЭК 60287 и содержит формулы для расчета значений R, W_d, λ_1 и λ_2 и устанавливает методы расчета номинальных токовых нагрузок кабелей по предельно допустимым значениям температуры, электрического сопротивления токопроводящей жилы, потерь и удельных тепловых сопротивлений.

В настоящем стандарте приведены также формулы для расчета потерь.

Формулы в настоящем стандарте содержат величины, значения которых изменяются в зависимости от конструкции кабеля и применяемых материалов. Указанные в таблицах значения соответствуют значениям, установленным в международных стандартах (например, удельное электрическое сопротивление и температурные коэффициенты сопротивления) или общепринятым в практике (например, удельное тепловое сопротивление и диэлектрические постоянные материалов). В последнем случае некоторые из указанных значений не являются характеристикой качества новых кабелей, а относятся к кабелям после длительного периода эксплуатации. Для того, чтобы можно было получить однородные и сравнимые результаты, необходимо рассчитывать номинальные токовые нагрузки по указанным в настоящем стандарте значениям. Если точно известно, что конкретным материалам и конструкции более соответствуют другие значения, то допускается использовать эти значения при условии, что они, а также соответствующие номинальные токовые нагрузки, будут указаны.

Значения, относящиеся к условиям эксплуатации кабелей, могут значительно отличаться друг от друга в разных странах. Например, значения температуры окружающей среды и удельного теплового сопротивления почвы в разных странах определяют исходя из требований национальных нормативных документов. Поверхностные сравнения значений, используемых в разных странах, могут привести к ошибочным заключениям, если они не основаны на общем критерии: например, могут быть различными предполагаемые сроки службы кабелей, в некоторых странах конструкция кабеля основана на максимальных значениях удельного теплового сопротивления почвы, в то время как в других странах применяют средние значения. Следует учитывать, что удельное тепловое сопротивление почвы зависит от содержания влаги в почве и может значительно изменяться с течением времени в зависимости от типа почвы, топографических и метеорологических условий, а также нагрузки кабеля.

Выбор значений различных параметров кабеля следует осуществлять в соответствии с настоящим стандартом.

Значения показателей должны быть основаны на результатах соответствующих измерений. Как правило, эти результаты уже включены в национальные технические требования в качестве рекомендуемых значений, поэтому расчет может быть основан на значениях, используемых в данной стране; такие значения приведены в МЭК 60287-3-1.

Информация, необходимая для выбора соответствующего типа кабеля, приведена в МЭК 60287-3-1.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Кабели электрические

РАСЧЕТ НОМИНАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ НАГРУЗКИ

Часть 1-1

Методы расчета номинальной токовой нагрузки (100 %-ный коэффициент нагрузки) и потерь. Общие положения

Electric cables. Calculation of the current rating. Part 1-1.
Methods for calculating the rated current load (100% load factor) and losses. General

Дата введения — 2023—01—01

1 Общие положения

1.1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на кабели на переменное напряжение и постоянное напряжение до 5 кВ, проложенные непосредственно в земле, каналах, лотках или стальных трубах, с частичным осушением почвы или без, а также проложенные на воздухе, и устанавливает методы расчета номинальной токовой нагрузки и потерь при установившемся режиме работы. Установившийся режим работы — непрерывный режим работы (100 %-ный коэффициент нагрузки) кабеля при токе постоянного значения, достаточном для того, чтобы асимптотически создать максимальную температуру жилы при постоянных условиях окружающей среды.

Настоящий стандарт содержит формулы для расчета номинальных токовых нагрузок и потерь.

С применением данных формул можно получить точные результаты, при этом в них допускается варьировать некоторыми важными параметрами. Эти параметры можно разделить на три группы:

- параметры, относящиеся к конструкции кабеля (например, удельное тепловое сопротивление изоляционного материала), для которых были выбраны характерные значения, основанные на опубликованных работах;
- параметры, относящиеся к условиям окружающей среды, которые могут быть разнообразными; выбор этих параметров зависит от страны, в которой применяют или будут применять кабели;
- параметры, которые принимают по соглашению между изготовителем и потребителем и которые включают в себя допустимые пределы надежности работы кабеля (например, максимальная температура жилы).

1.2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты [для датированных ссылок применяют только указанное издание ссылочного стандарта, для недатированных — последнее издание (включая все изменения к нему)]:

IEC 60027-3, Letter symbols to be used in electrical technology — Part 3: Logarithmic and related quantities, and their units (Буквенные обозначения, применяемые в электротехнике. Часть 3. Логарифмические величины и их единицы)

IEC 60028:1925, International standard of resistance for copper (Международные нормы на электрическое сопротивление меди)

IEC 60141 (all parts), Tests on oil-filled and gas-pressure cables and treir accessories [(все части) Испытания маслонаполненных кабелей и кабелей с газом под давлением и арматуры к ним]

IEC 60228, Conductors of insulated cables (Токопроводящие жилы изолированных кабелей)

Издание официальное

IEC 60502-1, Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV (U_m = 1,2 kV) up to 30 kV (U_m = 36 kV) — Part 1: Cables for rated voltages of 1 kV (U_m = 1,2 kV) and 3 kV (U_m = 3,6 kV) [Силовые кабели с экструдированной изоляцией и арматура к ним на номинальное напряжение от 1 кВ (U_m = 1,2 кВ) до 30 кВ (U_m = 36 кВ). Часть 1. Кабели на номинальное напряжение 1 кВ (U_m = 1,2 кВ) и 3 кВ (U_m = 3,6 кВ)]

IEC 60502-2, Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV (U_m = 1,2 kV) up to 30 kV (U_m = 36 kV) — Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV (U_m = 7,2 kV) up to 30 kV (U_m = 36 kV) [Силовые кабели с экструдированной изоляцией и арматура к ним на номинальное напряжение от 1 кВ (U_m = 1,2 кВ) до 30 кВ (U_m = 36 кВ). Часть 2. Кабели на номинальное напряжение от 6 кВ (U_m = 7,2 кВ) до 30 кВ (U_m = 36 кВ)]

IEC 60889, Hard-drawn aluminium wire for overhead line conductors (Твердотянутая алюминиевая проволока для проводов воздушных линий электропередачи)

1.3 Обозначения

В настоящем стандарте применены следующие обозначения:

A — площадь поперечного сечения брони кабеля, мм^2;

B_1, B_2 — коэффициенты (см. 2.4.2);

C — емкость изолированной жилы кабеля на единицу длины, Ф/м;

D_e^* — наружный диаметр кабеля, м;

D_i — наружный диаметр по изоляции (исключая экран) кабеля, мм;

D_s — наружный диаметр металлической оболочки кабеля, мм;

D_{oc} — диаметр воображаемого коаксиального цилиндра, касающегося выступов гофрированной оболочки кабеля, мм;

D_{it} — диаметр воображаемого цилиндра, касающегося внутренней поверхности впадин гофрированной оболочки кабеля, мм;

F — коэффициент, определенный в 2.3.5;

H — интенсивность солнечного излучения, Вт/м^2;

H — намагничивающая сила, ампер-витки/м (см. 2.4.2);

H_s — индуктивность оболочки, Гн/м;

H_1, H_2, H_3 — компоненты индуктивности, определяемые стальными проволоками, Гн/м (см. 2.4.2);

I — ток, проходящий по одной жиле (среднеквадратичное значение) кабеля, А;

M, N — коэффициенты, определенные в 2.3.5;

P, Q — коэффициенты, определенные в 2.3.3, Ом/м;

R — сопротивление жилы кабеля переменному току на единицу длины при максимальной рабочей температуре, Ом/м;

R_A — сопротивление брони кабеля переменному току при максимальной рабочей температуре, Ом/м;

R_{Ao} — сопротивление брони кабеля переменному току при температуре 20 °С, Ом/м;

R_e — эквивалентное сопротивление переменному току оболочки и брони кабеля, соединенных параллельно, Ом/м;

R_s — сопротивление оболочки или экрана кабеля переменному току при максимальной рабочей температуре, Ом/м;

R_{so} — сопротивление оболочки или экрана кабеля переменному току при температуре 20 °С, Ом/м;

R' — сопротивление жилы кабеля постоянному току на единицу длины при максимальной рабочей температуре, Ом/м;

R_o — сопротивление жилы кабеля постоянному току при температуре 20 °С, Ом/м;

T_1 — тепловое сопротивление на фазу между жилой и оболочкой кабеля на единицу длины, К·м/Вт;

T_2 — тепловое сопротивление между оболочкой и броней кабеля на единицу длины, К·м/Вт;

T_3 — тепловое сопротивление наружного защитного покрытия кабеля на единицу длины, К·м/Вт;

T_4 — тепловое сопротивление окружающей среды (отношение превышения температуры поверхности кабеля над температурой окружающей среды к потерям на единицу длины), К·м/Вт;

T_4^* — тепловое сопротивление окружающей среды при прокладке кабеля на воздухе с поправкой на солнечное излучение, К·м/Вт;

U_o — напряжение между жилой и экраном или оболочкой кабеля, В;

W_A — потери в броне кабеля на единицу длины, Вт/м;

W_c — потери в жиле кабеля на единицу длины, Вт/м;

W_d — диэлектрические потери изоляции жилы кабеля на единицу длины на фазу, Вт/м;

W_s — потери в оболочке кабеля на единицу длины, Вт/м;

$W_{(s+A)}$ — общие потери в оболочке и броне кабеля на единицу длины, Вт/м;

X — реактивное сопротивление оболочки или экрана на единицу длины кабеля (двухжильные кабели и трехжильные кабели, расположенные треугольником), Ом/м;

X_1 — реактивное сопротивление оболочки на единицу длины кабеля (при расположении кабелей в одной плоскости), Ом/м;

X_m — взаимное реактивное сопротивление на единицу длины кабеля между оболочкой одного кабеля и жилами двух других при расположении кабелей в одной плоскости, Ом/м;

a — минимальная длина малой секции при транспозиции в случае, когда малые секции имеют разные длины, мм;

c — расстояние между осями жил и осью кабеля для трехжильных кабелей (равное 0,55 r_1+ + 0,29 t для кабелей с секторными жилами), мм;

d — средний диаметр оболочки или экрана кабеля, мм;

d' — средний диаметр оболочки и усиливающего покрытия кабеля, мм;

d_2 — средний диаметр усиливающего покрытия кабеля, мм;

d_A — средний диаметр брони кабеля, мм;

d_c — наружный диаметр жилы кабеля, мм;

d'_c — наружный диаметр эквивалентной сплошной полой жилы кабеля, имеющей тот же центральный канал, мм;

d_d — внутренний диаметр трубы, мм;

d_f — диаметр стальной проволоки, мм;

d_i — внутренний диаметр полой жилы кабеля, мм;

d_M — максимальный диаметр по экрану или по оболочке кабеля с овальной жилой, мм;

d_m — минимальный диаметр экрана или оболочки кабеля с овальной жилой, мм;

d_x — диаметр эквивалентной круглой жилы с такой же площадью поперечного сечения и такой же степенью уплотнения, что и фасонная жила, мм;

f — частота системы или сети, Гц;

g_s — коэффициент, используемый в 2.3.6.1;

k — коэффициент, используемый при расчете потерь на гистерезис в броне или усиливающем покрове кабеля (см. 2.4.2.4);

k_p — коэффициент, применяемый для расчета x_p (эффекта близости);

k_s — коэффициент, применяемый для расчета x_s (поверхностного эффекта);

l — длина кабельной секции (общее обозначение, см. 2.3 и 2.3.4), м;

ln — натуральный логарифм (логарифм при основании e);

m — $\frac{\omega}{R_s}10^{-7}$;

n — число жил в кабеле;

n_1 — число стальных проволок в кабеле (см. 2.4.2);

p — длина шага наложения стальной проволоки вдоль кабеля, мм (см. 2.4.2);

p — коэффициент, используемый в 2.3.6.2;

q — коэффициент, используемый в 2.3.6.2;

r_1 — радиус окружности, описанной вокруг двух или трех фасонных жил кабеля, мм;

s — расстояние между осями жил кабеля, мм;

s_1 — расстояние между осями двух соседних кабелей, расположенных в группе из трех, не соприкасающихся друг с другом кабелей, проложенных горизонтально, мм;

s_2 — расстояние между осями кабелей, мм (см. 2.4.2);

t — толщина изоляции между жилами кабеля, мм;

t_3 — толщина защитного покрытия кабеля, мм;

t_s — толщина оболочки кабеля, мм;

v — отношение удельных тепловых сопротивлений сухой и влажной зон почвы ($v = \rho_d/\rho_w$);

x_p — аргумент функции Бесселя, используемый при расчете эффекта близости;

x_s — аргумент функции Бесселя, используемый при расчете поверхностного эффекта;

y_p — коэффициент эффекта близости (см. 2.1);

y_s — коэффициент поверхностного эффекта (см. 2.1);

α_{20} — температурный коэффициент удельного электрического сопротивления материала при температуре 20 °С, 1/К;

β — угол между осью проволок брони и осью кабеля (см. 2.4.2);

β_1 — коэффициент, используемый в 2.3.6.1;

γ — угол сдвига по времени (см. 2.4.2);

Δ_1 — коэффициент, используемый в 2.3.6.1;

Δ_2 — коэффициент, используемый в 2.3.6.1;

δ — эквивалентная толщина брони или защитного покрытия кабеля, мм;

$\operatorname{tg}\delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь изоляции кабеля;

ε — относительная диэлектрическая проницаемость изоляции кабеля;

θ — максимальная рабочая температура жилы кабеля, °С;

θ_a — температура окружающей среды, °С;

θ_{ar} — максимальная рабочая температура брони кабеля, °С;

θ_{sc} — максимальная рабочая температура экрана или оболочки кабеля, °С;

θ_x — критическая температура почвы, т.е. температура на границе между сухой и влажной зонами, °С;

$\Delta\theta$ — допустимое превышение температуры жилы кабеля над температурой окружающей среды, К;

$\Delta\theta_x$ — превышение критической температуры почвы, т.е. превышение температуры на границе между сухой и влажной зонами по сравнению с температурой окружающей кабель почвы, К;

λ_0 — коэффициент, используемый в 2.3.6.1;

λ_1, λ_2 — коэффициенты потерь, выраженные как отношение общих потерь в металлических оболочках и броне соответственно к общим потерям во всех жилах кабеля (или потерь в одной оболочке или броне к потерям в одной жиле кабеля);

λ_1' — коэффициент потерь, выраженный как отношение потерь в одной оболочке, обусловленных циркулирующими токами в оболочке, к потерям в одной жиле кабеля;

λ_1'' — коэффициент потерь, выраженный как отношение потерь в одной оболочке, обусловленных вихревыми токами, к потерям в одной жиле кабеля;

λ_{1m}' — коэффициент потерь для среднего кабеля;

λ_{11}' — коэффициент потерь для внешнего кабеля с наибольшими потерями;

λ_{12}' — коэффициент потерь для внешнего кабеля с наименьшими потерями;

} три одножильных кабеля, расположенные в одной плоскости без транспозиции, с оболочками, соединенными на обоих концах каждой электрической секции

μ — относительная магнитная проницаемость материала брони кабеля;

μ_e — продольная относительная магнитная проницаемость;

μ_t — поперечная относительная магнитная проницаемость;

ρ — удельное электрическое сопротивление материала жилы кабеля при температуре 20 °С, Ом·м;

ρ_d — удельное тепловое сопротивление сухой почвы, К·м/Вт;

ρ_w — удельное тепловое сопротивление влажной почвы, К·м/Вт;

ρ_s — удельное электрическое сопротивление оболочки кабеля при температуре 20 °С, Ом·м;

σ — коэффициент поглощения солнечного излучения поверхностью кабеля;

ω — угловая частота системы ($2\pi f$).

1.4 Расчет номинальной токовой нагрузки кабелей

При расчете номинальной токовой нагрузки в условиях частичного высыхания почвы следует рассчитать токовую нагрузку для условий, в которых не происходит высыхания почвы. Применяют меньшую из двух полученных нагрузок.

1.4.1 Кабели, проложенные в почве, высыхание которой не происходит, или кабели, проложенные на воздухе

1.4.1.1 Кабели на переменное напряжение

Номинальную токовую нагрузку (предельно допустимое значение тока, проходящего по одной жиле) кабелей на переменное напряжение получают из формулы, по которой вычисляют допустимое значение превышения температуры жилы над температурой окружающей среды

$$\Delta\theta = \left(I^2R + \frac{1}{2}W_d\right)T_1 + \left[I^2R(1+\lambda_1) + W_d\right]nT_2 + \left[I^2R(1+\lambda_1+\lambda_2) + W_d\right]n(T_3 + T_4),$$

где I — ток, проходящий по одной жиле кабеля (номинальная токовая нагрузка кабеля), А;

$\Delta\theta$ — превышение температуры жилы кабеля над средней температурой окружающей среды, К;

Примечание — В данной формуле под средней температурой окружающей среды подразумевают температуру окружающей среды при нормальных условиях эксплуатации и в случае прокладки кабеля с учетом влияния любого местного источника тепла, но без учета повышения температуры от кабелей, расположенных в непосредственной близости, вследствие выделяющегося из них тепла.

R — сопротивление жилы кабеля переменному току на единицу длины при максимальной рабочей температуре, Ом/м;

W_d — диэлектрические потери изоляции жилы кабеля на единицу длины, Вт/м;

T_1 — тепловое сопротивление между жилой и оболочкой кабеля на единицу длины, К·м/Вт;

T_2 — тепловое сопротивление подушки между оболочкой и броней кабеля на единицу длины, К·м/Вт;

T_3 — тепловое сопротивление наружного защитного покрытия кабеля на единицу длины, К·м/Вт;

T_4 — тепловое сопротивление между поверхностью кабеля и окружающей средой на единицу длины, полученное по МЭК 60287-2-1:1994 (подраздел 2.2), К·м/Вт;

n — число жил в кабеле, несущих нагрузку (жилы одинакового размера и несущие одну и ту же нагрузку);

λ_1 — отношение общих потерь в металлической оболочке к общим потерям во всех жилах кабеля;

λ_2 — отношение общих потерь в броне к общим потерям во всех жилах кабеля.

Значение номинальной токовой нагрузки вычисляют по формуле

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d \left[0{,}5\ T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4) \right]}{RT_1 + nR(1+\lambda_1)T_2 + nR(1+\lambda_1+\lambda_2)(T_3+T_4)} \right]^{0{,}5}.$$

Если кабель подвергается воздействию прямых солнечных лучей, то следует применять формулу по МЭК 60287-2-1:1994 (пункт 2.2.1.2).

Номинальную токовую нагрузку четырехжильного кабеля на низкое напряжение допускается принимать равной номинальной токовой нагрузке трехжильного кабеля на то же напряжение, с теми же размерами жил и аналогичной конструкции, при условии, что кабель будут применять в трехфазной системе, в которой четвертая жила является нейтральным или защитным проводником. В случае нейтрального проводника номинальная токовая нагрузка относится к симметричной нагрузке.

1.4.1.2 Кабели на постоянное напряжение до 5 кВ

Значение номинальной токовой нагрузки кабелей на постоянное напряжение до 5 кВ вычисляют по формуле

$$I = \left[\frac{\Delta\theta}{R'T_1 + nR'T_2 + nR'(T_3 + T_4)} \right]^{0{,}5},$$

где R' — сопротивление жилы кабеля постоянному току на единицу длины при максимальной рабочей температуре, Ом/м.

Если кабель подвергается воздействию прямых солнечных лучей, то следует применять формулу по МЭК 60287-2-1:1994 (пункт 2.2.1.2).

1.4.2 Кабели, проложенные в условиях частичного высыхания почвы

1.4.2.1 Кабели на переменное напряжение

Данный метод применяют для одиночных изолированных кабелей или цепей, проложенных на обычной глубине. Метод основан на двухзоновой модели почвы, в которой одна зона, прилегающая к кабелю, высушена, в то время как другая зона сохраняет тепловое удельное сопротивление окружающей среды, при этом граница между этими зонами изотермическая[1)]. Данный метод используют для кабелей тех областей применения, в которых влияние почвы учитывают по упрощенной форме.

Примечание — Требования к прокладке более одной цепи, а также необходимое расстояние между цепями находятся в стадии рассмотрения.

Номинальную токовую нагрузку с учетом изменения внешнего теплового сопротивления вследствие образования сухой зоны вокруг одиночного изолированного кабеля или цепи вычисляют по формуле (см. также формулу по 1.4.1.1)

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d \left[0{,}5T_1 + n(T_2 + T_3 + vT_4) \right] + (v-1)\Delta\theta_x}{R\left[T_1 + n(1+\lambda_1)T_2 + n(1+\lambda_1+\lambda_2)\ (T_3 + vT_4) \right]} \right]^{0{,}5},$$

где v — отношение тепловых удельных сопротивлений сухой и влажной зон почвы ($v = \rho_d/\rho_w$);

ρ_d — удельное тепловое сопротивление сухой почвы, К·м/Вт;

ρ_w — удельное тепловое сопротивление влажной почвы, К·м/Вт;

θ_x — критическая температура почвы, т. е. температура на границе между сухой и влажной зонами, °С;

θ_a — температура окружающей среды, °С;

$\Delta\theta_x$ — превышение критической температуры почвы, т. е. превышение температуры на границе между сухой и влажной зонами по сравнению с температурой окружающей почвы ($\theta_x - \theta_a$), К.

Значения θ_x и ρ_d определяют на основе имеющейся информации о параметрах почвы.

Примечания

1 Значение T_4 определяют, применяя удельное тепловое сопротивление влажной почвы (ρ_w) и МЭК 60287-2-1:1994 (пункт 2.2.3.2). При этом не учитывают изменения превышения температуры за счет взаимного нагрева кабелей по МЭК 60287-2-1:1994 (пункт 2.2.3.1).

2 Значения соответствующих параметров почвы находятся в стадии рассмотрения. Эти значения допускается согласовывать между изготовителем и заказчиком (потребителем).

[1)] См. «Current ratings of cables buried in partially dried-out soil, Part 1»//Electra № 104. Январь 1966 г. (с. 11, раздел 3 и приложение 1).

1.4.2.2 Кабели на постоянное напряжение до 5 кВ

Номинальную токовую нагрузку кабелей на постоянное напряжение вычисляют по формуле

$$I = \left[\frac{\Delta\theta + (v-1)\Delta\theta_x}{R'\left[T_1 + nT_2 + n(T_3 + vT_4)\right]}\right]^{0,5}.$$

1.4.3 Кабели, проложенные в условиях, в которых высыхания грунта не происходит

1.4.3.1 Кабели на переменное напряжение

Если не следует допускать миграцию влаги, ограничив превышение температуры поверхности кабеля до значения не более $\Delta\theta_x$, то соответствующее значение номинальной токовой нагрузки вычисляют по формуле

$$I = \left[\frac{\Delta\theta_x - nW_d T_4}{nRT_4(1+\lambda_1+\lambda_2)}\right]^{0,5}.$$

Следует учитывать, что в зависимости от значения $\Delta\theta_x$ такое ограничение может отразиться на температуре жилы, которая может превысить максимально допустимое значение. При этом значение номинальной токовой нагрузки должно быть меньшим из двух значений, полученных по данной формуле или формуле, приведенной в 1.4.1.1.

Значение R вычисляют для соответствующей температуры жилы, которая должна быть менее максимально допустимого значения. Проводят оценку рабочей температуры и при необходимости ее корректируют.

Примечание — Для определения номинальной токовой нагрузки четырехжильных низковольтных кабелей применяют последний абзац 1.4.1.1.

1.4.3.2 Кабели на постоянное напряжение до 5 кВ

Номинальную токовую нагрузку кабелей на постоянное напряжение вычисляют по формуле

$$I = \left[\frac{\Delta\theta_x}{nR'T_4}\right]^{0,5}.$$

Значение R' следует принять по 1.4.2.2.

1.4.4 Кабели, подверженные прямому солнечному излучению

Номинальные токовые нагрузки

Номинальную токовую нагрузку кабелей с учетом воздействия солнечного излучения вычисляют по следующим формулам.

1.4.4.1 Для кабелей на переменное напряжение

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d\left[0,5T_1 + n\left(T_2 + T_3 + T_4^*\right)\right] - \sigma D_e^* H T_4^*}{RT_1 + nR(1+\lambda_1)T_2 + nR(1+\lambda_1+\lambda_2)\left(T_3 + T_4^*\right)}\right]^{0,5}.$$

1.4.4.2 Для кабелей на постоянное напряжение до 5 кВ

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - \sigma D_e^* H T_4^*}{R'T_1 + nR'T_2 + nR'(T_3 + T_4^*)}\right]^{0,5},$$

где σ — коэффициент поглощения солнечного излучения поверхностью кабеля (см. таблицу 4);

H — интенсивность солнечного излучения, значение которого принимают равным 10^3 Вт/м^2 для большинства широт; рекомендуется, по возможности, применять значение, установленное для климатической зоны эксплуатации кабеля;

T_4^* — тепловое сопротивление окружающей среды при прокладке кабеля на воздухе с поправкой на солнечное излучение (см. МЭК 60287-2-1), К·м/Вт;

D_e^* — наружный диаметр кабеля, м, для кабелей с гофрированными оболочками $D_e^* = (D_{oc} + 2t_3)10^{-3}$;

t_3 — толщина защитного покрытия кабеля, мм.

2 Расчет потерь

2.1 Сопротивление жилы кабеля переменному току

Сопротивление жилы кабеля переменному току на единицу длины R, Ом/м, при максимальной рабочей температуре во всех случаях, за исключением кабелей, проложенных в трубопроводах (см. 2.1.5), вычисляют по формуле

$$R = R'(1 + y_s + y_p),$$

где y_s — коэффициент поверхностного эффекта;

y_p — коэффициент эффекта близости.

2.1.1 Сопротивление жилы кабеля постоянному току

Сопротивление жилы кабеля постоянному току на единицу длины R', Ом/м, при максимальной рабочей температуре θ, °С, вычисляют по формуле

$$R' = R_0 [1+ \alpha_{20}(\theta - 20)],$$

где R_0 — сопротивление жилы кабеля постоянному току при температуре 20 °С, Ом/м.

Значение R_0 установлено в МЭК 60228. Если жила кабеля не соответствует МЭК 60228, то значение R_0 допускается устанавливать по соглашению между изготовителем и заказчиком (потребителем). Сопротивление жилы кабеля вычисляют, используя значения удельного электрического сопротивления, приведенные в таблице 1;

α_{20} — температурный коэффициент удельного электрического сопротивления материала при температуре 20 °С (см. стандартные значения в таблице 1);

θ — максимальная рабочая температура жилы кабеля, °С (зависит от типа используемой изоляции), значение которой установлено в стандарте или технических условиях на кабель конкретного типа.

Таблица 1 — Значения удельного электрического сопротивления и температурного коэффициента материалов, применяемых для изготовления кабелей

Материал	Удельное электрическое сопротивление при температуре 20 °С ρ, Ом·м	Температурный коэффициент при температуре 20 °С α_{20}, 1/К
a) Жилы		
Медь	$1{,}7241 \cdot 10^{-8}$	$3{,}93 \cdot 10^{-3}$
Алюминий	$2{,}8264 \cdot 10^{-8}$	$4{,}03 \cdot 10^{-3}$
b) Оболочка и броня		
Свинец или свинцовые сплавы	$21{,}4 \cdot 10^{-8}$	$4{,}0 \cdot 10^{-3}$
Сталь	$13{,}8 \cdot 10^{-8}$	$4{,}5 \cdot 10^{-3}$
Бронза	$3{,}5 \cdot 10^{-8}$	$3{,}0 \cdot 10^{-3}$
Нержавеющая сталь	$70{,}0 \cdot 10^{-8}$	Допускается пренебречь
Алюминий	$2{,}84 \cdot 10^{-8}$	$4{,}03 \cdot 10^{-3}$
Примечание — Значения для медных токопроводящих жил приведены в МЭК 60028. Значения для алюминиевых токопроводящих жил приведены в МЭК 60889.		

2.1.2 Коэффициент поверхностного эффекта y_s

Коэффициент поверхностного эффекта y_s вычисляют по следующими формулам:

для $0 < x_s \le 2{,}8$ $\quad y_s = \dfrac{x_s^4}{192 + 0{,}8x_s^4}$,

для $2{,}8 < x_s \le 3{,}8$ $\quad y_s = -0{,}136 - 0{,}0177x_s + 0{,}0563x_s^2$,

для $x_s > 3{,}8$ $\quad y_s = 0{,}354x_s - 0{,}733$,

где $x_s^2 = \dfrac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_s$;

f — частота сети, Гц.

Значения k_s приведены в таблице 2.

При отсутствии соответствующей формулы для кабелей с жилами секторного и овального сечения рекомендуется использовать вышеприведенную формулу.

2.1.3 Коэффициент эффекта близости y_p для двухжильных кабелей и двух одножильных кабелей

Коэффициент эффекта близости вычисляют по формуле

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0{,}8x_p^4}\left(\frac{d_c}{s}\right)^2 2{,}9,$$

где $x_p^2 = \frac{8\pi f}{R'}10^{-7}k_p$;

d_c — наружный диаметр жилы кабеля, мм;

s — расстояние между осями жил кабеля, мм.

Значения k_p приведены в таблице 2.

Если x_p не более 2,8, то результаты, полученные по данной формуле, являются точными, поэтому данную формулу рекомендуется применять в большинстве случаев.

Таблица 2 — Экспериментальные значения коэффициентов k_s и k_p для расчета коэффициентов поверхностного эффекта и эффекта близости

Тип жилы	Система изоляции токопроводящей жилы	k_s	k_p
Медная:			
- круглая, сплошная	Все	1	1
- круглая, многопроволочная	Жидкость[d]/бумага[e]/полипропилен[f]	1	0,8
- круглая, многопроволочная	Экструдированная[g]/минеральная[h]	1	1
- круглая, типа Милликен[c]	Жидкость/бумага/полипропилен	0,435	0,37
- круглые, типа Милликен, изолированные провода[b]	Экструдированная	0,35	0,20
- круглые, типа Милликен, неизолированные однонаправленные провода[b]	Экструдированная	0,62	0,37
- круглые, типа Милликен, неизолированные двунаправленные провода[b]	Экструдированная	0,80	0,37
- полая, спиральноскрученная	Все	[a]	0,8
- секторная	Жидкость/бумага/полипропилен	1	0,8
- секторная	Экструдированная/минеральная	1	1
Алюминиевая:			
- круглая, сплошная	Все	1	1
- круглая, многопроволочная	Все	1	0,8
- круглая, типа Милликен	Все	0,25	0,15
- полая, спиральноскрученная	Все	[a]	0,8

[a] Значение k_s вычисляют по формуле

$$k_s = \left(\frac{d'_c - d_i}{d'_c + d_i}\right)\left(\frac{d'_c + 2d_i}{d'_c + d_i}\right)^2,$$

где d_i — внутренний диаметр полой жилы (центрального канала) кабеля, мм;

d'_c — наружный диаметр эквивалентной сплошной полой жилы кабеля, имеющей тот же центральный канал, мм.

[b] Коэффициенты для этих конструкций кабелей могут зависеть от деталей конструкции токопроводящей жилы. Допускается применять измеренные значения сопротивления переменному току по соглашению между изготовителем и заказчиком (потребителем). Метод общего измерения находится на рассмотрении. В CIGRE (TB272) приведены три метода измерений.

Окончание таблицы 2

[c] Токопроводящая жила типа Милликен: скрученная токопроводящая жила, состоящая из ряда скрученных фасонных токопроводящих жил, имеющих незначительную изоляцию друг от друга. Отдельные повивы могут быть изолированными (например, эмалированными или окисленными), или неизолированными.

[d] Жидкостная изоляция: система изоляции, состоящая из бумажной обмотки и изолирующей жидкости, конструкция которой допускает свободное перемещение жидкости в кабеле.

[e] Бумажная изоляция: изоляция в виде обмотки, состоящая из бумаги, пропитанной изоляционным материалом.

[f] Полипропиленовая изоляция: изоляция в виде полипропиленового/бумажного ламината, которую в кабеле, заполненном жидкостью, применяют вместо бумажной обмотки.

[g] Экструдированная изоляция: изоляция, состоящая, как правило, из одного слоя полимерного материала и наложенная методом экструзии.

[h] Минеральная изоляция: изоляция, состоящая из сжатого минерального порошка, как правило, ее применяют только в специальных типах низковольтных кабелей.

Примечания

1 Значения k_s и k_p для многопроволочных скрученных жил большого диаметра выбирают из указанных в Технической брошюре CIGRE (ссылочный № 272) «Конструкции с большими площадями поперечного сечения жил и композитными экранами».

2 Значение k_s, указанное для круглых жил, жил типа Милликен, жил, скрученных из изолированных проволок, является предельным значением, используемым для всех методов изолирования проволок, включая эмалирование, оксидирование и другие методы.

3 Значение k_s, указанное для полой многопроволочной спирально скрученной токопроводящей жилы, используют также для токопроводящих жил из трапецеидальных проволок.

2.1.4 Коэффициент эффекта близости y_p для трехжильных кабелей и для трех одножильных кабелей

2.1.4.1 Кабели с круглыми жилами

Коэффициент эффекта близости вычисляют по формуле

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0{,}8x_p^4}\left(\frac{d_c}{s}\right)^2\left[0{,}312\left(\frac{d_c}{s}\right)^2 + \frac{1{,}18}{\frac{x_p^4}{192 + 0{,}8x_p^4} + 0{,}27}\right],$$

где $x_p^2 = \frac{8\pi f}{R'}10^{-7}k_p$.

Примечание — Для кабелей, расположенных в одной плоскости, s — это расстояние между соседними фазами. Если расстояние между соседними фазами неодинаковое, то $s = \sqrt{s_1 s_2}$.

Значения k_p приведены в таблице 2.

Если x_p не более 2,8, то результаты, полученные по данной формуле, являются точными, поэтому данную формулу рекомендуется применять в большинстве случаев.

2.1.4.2 Кабели с фасонными жилами

Для многожильных кабелей с фасонными жилами значение y_p должно составлять 2/3 значения, определенного в соответствии с 2.1.4.1.

При этом:

$d_c = d_x$ — диаметр эквивалентной круглой жилы с такой же площадью поперечного сечения и такой же степенью уплотнения, мм; при этом $s = (d_x + t)$, мм,

где t — толщина изоляции между жилами кабеля, мм.

Значения k_p приведены в таблице 2.

Если x_p не более 2,8, то результаты, полученные по указанной выше формуле, являются точными, поэтому данную формулу рекомендуется применять в большинстве случаев.

2.1.5 Коэффициенты поверхностного эффекта и эффекта близости для кабелей, проложенных в трубопроводах

Для кабелей, проложенных в трубопроводах, коэффициенты поверхностного эффекта и эффекта близости, определенные в соответствии с 2.1.2, 2.1.3 и 2.1.4, следует увеличить на коэффициент 1,5. Значение R, Ом/м, вычисляют по формуле

$$R = R'[1 + 1{,}5(y_s + y_p)],$$

2.2 Диэлектрические потери для кабелей на переменное напряжение

Диэлектрические потери зависят от напряжения и становятся значительными при определенных уровнях напряжения, соответствующих применяемому изоляционному материалу. В таблице 3 указаны значения напряжения между жилой и экраном или оболочкой кабеля U_o, В, для общепринятых изоляционных материалов, при которых необходимо учитывать диэлектрические потери для трехжильных экранированных или одножильных кабелей. Допускается не рассчитывать диэлектрические потери для неэкранированных многожильных кабелей или кабелей на постоянное напряжение.

Таблица 3 — Значения относительной диэлектрической проницаемости ε и тангенса угла диэлектрических потерь tg δ изоляции кабелей на среднее и высокое напряжение промышленной частоты

Тип кабеля	ε	tg δ^*
Кабели с пропитанной бумажной изоляцией		
С вязкой пропиткой, полностью пропитанные, с предварительной пропиткой или с пропиткой нестекающим составом	4	0,01
Кабели маслонаполненные, автономные[a]:		
- на номинальное напряжение до U_o = 36 кВ	3,6	0,0035
- на номинальное напряжение до U_o = 87 кВ	3,6	0,0033
- на номинальное напряжение до U_o = 160 кВ	3,5	0,0030
- на номинальное напряжение до U_o = 220 кВ	3,5	0,0028
Маслонаполненные кабели в трубах под давлением[b]	3,7	0,0045
Газонаполненные кабели с внешним давлением газа[c]	3,6	0,0040
Газонаполненные кабели с внутренним давлением газа[d]	3,4	0,0045
Кабели с другими видами изоляции		
Бутилкаучук	4	0,050
Этиленпропиленовая резина (ЭПР)[e]:		
- для кабелей на номинальное напряжение до 18/30 (36) кВ включ.	3	0,020
- для кабелей на номинальное напряжение св. 18/30 (36) кВ	3	0,005
Поливинилхлорид (ПВХ)[e]	8	0,1
Полиэтилен (ПЭ) высокой (ВП) или низкой (НП) плотности[e]	2,3	0,001
Сшитый полиэтилен (СПЭ)[e]:		
- для кабелей на номинальное напряжение до 18/30 (36) кВ включ. (без заполнения)	2,5	0,004
- для кабелей на номинальное напряжение св. 18/30 (36) кВ (без заполнения)	2,5	0,001
- для кабелей на номинальное напряжение св. 18/30 (36) кВ (с заполнением)	3,0	0,005
Полипропилен (ППЛ):		
- для кабелей на номинальное напряжение, равное или св. 63/110 кВ	2,8	0,0014

* Как правило, для каждого типа кабелей указывают допустимые значения при максимально допустимых температурах, возникающих при самых высоких напряжениях.

[a] См. МЭК 60141-1.

[b] См. МЭК 60141-4.

[c] См. МЭК 60141-3.

[d] См. МЭК 60141-2.

[e] См. МЭК 60502-1 и МЭК 60502-2.

Примечание — Если значения U_o равны значениям, приведенным ниже или более, то в этом случае следует учитывать значение диэлектрических потерь.

Окончание таблицы 3

Тип кабеля	U_o, кВ
Кабели с пропитанной бумажной изоляцией	
- с вязкой пропиткой	38
- маслонаполненные кабели и кабели с газом под давлением	63,5
Кабели с изоляцией других типов:	
Бутилкаучук	18
ЭПР	63,5
ПВХ	6
ПЭВП или ПЭНП	127
СПЭ (без заполнения)	127
СПЭ (с заполнением)	63,5

Диэлектрические потери на единицу длины в каждой фазе W_d, Вт/м, вычисляют по формуле

$$W_d = \omega C U_o^2 \operatorname{tg} \delta,$$

где $\omega = 2\pi f$;

C — емкость изолированной жилы кабеля на единицу длины, Ф/м;

U_o — напряжение между жилой и землей, В.

Значения tg δ изоляции кабеля при промышленной частоте и рабочей температуре приведены в таблице 3.

Для кабелей с круглыми жилами значение C, Ф/м, вычисляют по формуле

$$C = \frac{\varepsilon}{18 \ln\left(\frac{D_i}{d_c}\right)} 10^{-9},$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость изоляции кабеля;

D_i — наружный диаметр по изоляции (исключая экран) кабеля, мм;

d_c — диаметр жилы, включая полимерный экран, при его наличии, мм.

Данную формулу допускается применять для кабелей с овальными жилами, подставив вместо D_i и d_c средние геометрические значения соответствующих максимальных и минимальных диаметров.

Значения ε приведены в таблице 3.

2.3 Коэффициент потерь в оболочке и экране для кабелей на переменное напряжение промышленной частоты

Значение коэффициента потерь в оболочке или экране λ_1 получают путем сложения значений коэффициентов потерь, обусловленных циркулирующими токами λ_1' и вихревыми токами λ_1'', следующим образом

$$\lambda_1 = \lambda_1' + \lambda_1''.$$

По формулам, приведенным в данном пункте, вычисляют потери в оболочке кабеля через общие потери в жиле (жилах) с указанием в каждом отдельном случае конкретного вида потерь. Формулы для одножильных кабелей применимы только к однофазным цепям, при этом влияние токов утечки на землю не учитывают. Методы расчета применимы для кабелей как с гладкими, так и гофрированными оболочками.

Для одножильных кабелей с оболочками, соединенными с обоих концов электрической секции, следует учитывать только потери вследствие продольных токов в оболочках (см. 2.3.1, 2.3.2 и 2.3.3). Электрической секцией считают часть трассы между точками, в которых соединены оболочки или экраны всех кабелей.

Как правило, принимают в расчет увеличение расстояния между кабелями в определенных точках трассы (см. 2.3.4).

Для кабелей с токопроводящими жилами типа Милликен коэффициент потерь следует увеличить, чтобы учесть потери, вызываемые вихревыми токами в оболочках (см. 2.3.5).

Для систем кабелей с перекрестным соединением оболочек не следует полагать, что малые секции электрически идентичны и потери вследствие циркуляции токов в оболочках незначительны. В 2.3.6 даны рекомендации по расчету увеличения потерь в оболочках с учетом данного электрического дисбаланса.

Значения удельного электрического сопротивления и температурных коэффициентов свинца и алюминия, необходимые для расчета сопротивления оболочки или экрана кабеля переменному току при максимальной рабочей температуре R_s, приведены в таблице 1.

В формулах данного пункта использовано значение сопротивления оболочки или экрана при максимальной температуре. Максимальную рабочую температуру оболочки или экрана кабеля θ_{sc}, °С, вычисляют по формуле

$$\theta_{sc} = \theta_c - (I^2R + 0{,}5W_d)T_1.$$

Температура оболочки или экрана является функцией тока I, поэтому при расчете применяют итеративный метод.

Сопротивление оболочки или экрана кабеля переменному току при максимальной рабочей температуре R_s, Ом/м, вычисляют по формуле

$$R_s = R_{so}\,[1 + \alpha_{20}(\theta_{sc} - 20)],$$

где R_{so} — сопротивление оболочки или экрана кабеля переменному току при температуре 20 °С, Ом/м.

2.3.1 Два одножильных кабеля и три одножильных кабеля (расположенные треугольником), оболочки которых соединены на обоих концах каждой электрической секции

Для двух одножильных кабелей и трех одножильных кабелей (расположенных треугольником), оболочки которых соединены на обоих концах, коэффициент потерь λ_1' вычисляют по формуле

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R}\frac{1}{1+\left(\frac{R_s}{X}\right)^2},$$

где X — реактивное сопротивление оболочки или экрана на единицу длины кабеля, Ом/м, вычисляемое по формуле

$$X = 2\omega 10^{-7}\ln\left(\frac{2s}{d}\right),$$

где $\omega = 2\pi f$, 1/с;

s — расстояние между осями жил в данной электрической секции, мм;

d — средний диаметр оболочки или экрана кабеля, мм, который для кабелей с овальными жилами выражают как $\sqrt{d_M \cdot d_m}$, где d_M и d_m — максимальный и минимальный средние диаметры оболочки или экрана кабеля соответственно; для кабелей с гофрированными оболочками d выражают как $1/2(D_{oc} + D_{it})$;

$\lambda_1'' = 0$, т. е. коэффициент потерь, обусловленных вихревыми токами, не учитывают, за исключением кабелей с сегментными жилами большого сечения типа Милликен, когда коэффициент потерь λ_1'' определяют методом по 2.3.5.

2.3.2 Три одножильных кабеля, расположенные в одной плоскости, с регулярной транспозицией (оболочки соединены на обоих концах каждой электрической секции)

Для трех одножильных кабелей, расположенных в одной плоскости, со средним кабелем, равноотстоящим от наружных кабелей, с регулярной транспозицией кабелей и оболочками, соединенными в каждой третьей транспозиции, коэффициент потерь λ_1' вычисляют по формуле

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R}\frac{1}{1+\left(\frac{R_s}{X_1}\right)^2},$$

где X_1 — реактивное сопротивление оболочки на единицу длины кабеля, Ом/м, вычисляемое по формуле

$$X_1 = 2\omega 10^{-7} \ln\left\{2\sqrt[3]{2}\left(\frac{s}{d}\right)\right\};$$

λ_1'' = 0,т.е. коэффициент потерь, обусловленных вихревыми токами, не учитывают, за исключением кабелей с сегментными жилами большого сечения типа Милликен, когда коэффициент потерь λ_1'' определяют методом по 2.3.5.

2.3.3 Три одножильных кабеля, расположенные в одной плоскости, без транспозиции, с оболочками, соединенными на обоих концах каждой электрической секции

Для трех одножильных кабелей, расположенных в одной плоскости, со средним кабелем, равноотстоящим от наружных кабелей, без транспозиции и с оболочками, соединенными на обоих концах электрической секции, коэффициент потерь для внешнего кабеля с наибольшими потерями, коэффициент потерь λ_{11}' (т.е. наружного кабеля, несущего отстающую фазу), вычисляют по формуле

$$\lambda_{11}' = \frac{R_s}{R}\left[\frac{0{,}75\ P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{0{,}25\ Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{2R_s PQX_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)\ (R_s^2 + Q^2)}\right].$$

Коэффициент потерь λ_{12}' для внешнего кабеля с наименьшими потерями вычисляют по формуле

$$\lambda_{12}' = \frac{R_s}{R}\left[\frac{0{,}75\ P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{0{,}25\ Q^2}{R_s^2 + Q^2} - \frac{2R_s PQX_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)\ (R_s^2 + Q^2)}\right].$$

Для среднего кабеля коэффициент потерь λ_{1m}' вычисляют по формуле

$$\lambda_{1m}' = \frac{R_s}{R}\frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2},$$

где $P = X + X_m$;

$$Q = X - \frac{X_m}{3},$$

где X — реактивное сопротивление оболочки или экрана на единицу длины кабеля для двух соседних одножильных кабелей, Ом/м, вычисляемое по формуле

$$X = 2\omega 10^{-7} \ln\left(\frac{2s}{d}\right),$$

X_m — взаимное реактивное сопротивление на единицу длины кабеля между оболочкой наружного кабеля и жилами двух других при расположении кабелей в одной плоскости, Ом/м, вычисляемое по формуле

$$X_m = 2\omega 10^{-7} \ln(2),$$

λ_1'' = 0, т.е. коэффициент потерь, обусловленных вихревыми токами, не учитывают, за исключением кабелей с сегментными жилами большого сечения типа Милликен, когда коэффициент потерь λ_1'' определяют методом по 2.3.5.

Расчеты номинальных токовых нагрузок кабелей, проложенных на воздухе, должны быть основаны на первой формуле настоящего пункта, т.е. на результатах вычисления потерь в наружном кабеле, несущем отстающую фазу.

2.3.4 Влияние изменения расстояния между одножильными кабелями на участке между точками соединения оболочек

В цепях одножильных кабелей с оболочками, соединенными на обоих концах и возможно в промежуточных точках циркулирующие токи и обусловленные ими потери возрастают по мере увеличения расстояния между кабелями, поэтому рекомендуется использовать как можно меньшее расстояние между кабелями. Оптимальное расстояние можно получить путем расчета как потерь, так и взаимного нагрева кабелей.

Не всегда возможно проложить кабели, соблюдая оптимальное расстояние между ними на протяжении всей трассы. Ниже приведены рекомендации по расчету потерь в оболочке кабеля вследствие циркулирующих токов, когда невозможно проложить кабели с постоянным расстоянием между ними на протяжении длины одной электрической секции. Секцией считают часть трассы между точками

соединения оболочек всех кабелей. Если применять приведенные рекомендации, то можно получить значения коэффициентов потерь, которые относятся ко всей секции, при этом следует учитывать, что соответствующие значения сопротивления жилы и внешнего теплового сопротивления должны быть рассчитаны на основании наименьшего расстояния между кабелями в любом месте секции.

a) Если расстояние между кабелями в секции не постоянное, но известны различные его значения, то значение X в 2.3.1, 2.3.2 и 2.3.3 вычисляют по формуле

$$X = \frac{l_a X_a + l_b X_b + ... + l_n X_n}{l_a + l_b + ... + l_n},$$

где l_a, l_b, ... l_n — длины кабельных секций с различным расстоянием между кабелями;

X_a, X_b, ... X_n — реактивные сопротивления оболочки или экрана на единицу длины кабеля, соответствующие формулы приведены в 2.3.1, 2.3.2 или 2.3.3, в которых применены соответствующие значения расстояний между осями жил кабеля s_a, s_b, ... s_n.

b) Если в какой-либо секции расстояние между кабелями и его отклонения вдоль трассы не известны и не могут быть вычислены, то потери в этой секции, определенные на основании расчетного расстояния между кабелями, следует увеличить на 25 % — это значение соответствует кабелям высокого напряжения со свинцовой оболочкой. По соглашению между изготовителем и потребителем допускается применять другое увеличение, если 25 % не соответствует условиям частного случая прокладки.

c) Если секция включает расширяющийся конец, то увеличения по перечислению b) недостаточно, и рекомендуется провести оценку расстояния и рассчитать потери по указанной в перечислении a) методике.

Примечание — Такое увеличение не допускается для линий кабелей с соединением оболочек в одной точке или перекрестным соединением (см. 2.3.6).

2.3.5 Коэффициент потерь в кабелях с токопроводящими жилами типа Милликен

Если коэффициент близости мал (например, при токопроводящих жилах типа Милликен), то следует учитывать коэффициент потерь в оболочке кабеля λ_1'' в методах по 2.3.1, 2.3.2 и 2.3.3, который определяют путем умножения значения λ_1'', полученного по 2.3.6 для этой конструкции кабеля, на коэффициент F, вычисляемый по формуле

$$F = \frac{4M^2N^2 + (M+N)^2}{4(M^2+1)(N^2+1)},$$

где $M = N = \dfrac{R_s}{X}$ — для кабелей, расположенных треугольником,

или

$$\left.\begin{aligned} M &= \frac{R_s}{X + X_m} \\ N &= \frac{R_s}{X - \dfrac{X_m}{3}} \end{aligned}\right\}$$ — для кабелей, расположенных в одной плоскости на равном расстоянии друг от друга.

Если расстояние между кабелями в секции не постоянное, то значение X следует вычислять по 2.3.4, перечисление a).

2.3.6 Одножильные кабели с соединением оболочек в одной точке или перекрестным соединением

2.3.6.1 Потери, обусловленные вихревыми токами

Для одножильных кабелей с соединением оболочек в одной точке или перекрестным соединением коэффициент потерь λ_1'' вычисляют по формуле

$$\lambda_1'' = \frac{R_s}{R}\left[g_s\lambda_0(1+\Delta_1+\Delta_2) + \frac{(\beta_1 t_s)^4}{12\cdot 10^{12}}\right],$$

где $g_s = 1 + \left(\dfrac{t_s}{D_s}\right)^{1,74}\left(\beta_1 D_s 10^{-3} - 1{,}6\right)$;

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4\pi\omega}{10^7 \rho_s}};$$

ρ_s — удельное электрическое сопротивление материала оболочки кабеля при температуре 20 °С (см. таблицу 1), Ом·м;

D_s — наружный диаметр оболочки кабеля, мм.

Примечание — Для кабелей с гофрированными оболочками в качестве коэффициента g_s применяют средний наружный диаметр, вычисляемый по формуле $\frac{D_{oc} + D_{it}}{2} + t_s$, где t_s — толщина оболочки кабеля, мм.

Примечания

1 Для кабелей в свинцовой оболочке коэффициент g_s допускается принимать за единицу, при этом значение, полученное по $\frac{(\beta_1 t_s)^4}{12 \cdot 10^{12}}$, можно не учитывать.

2 Следует учитывать, что для кабелей в алюминиевой оболочке может потребоваться определение коэффициента g_s и значения по $\frac{(\beta_1 t_s)^4}{12 \cdot 10^{12}}$, если диаметр оболочки кабеля более 70 мм или толщина оболочки более обычной.

3 Для кабелей с проволочным экраном и выравнивающей лентой или с фольгированным экраном поверх проволок допускается не учитывать коэффициент потерь, обусловленных вихревыми токами.

Формулы для вычисления коэффициентов λ_0, Δ_1 и Δ_2 приведены ниже, где $m = \frac{\omega}{R_s} 10^{-7}$ при $m \le 0{,}1$ Δ_1 и Δ_2 допускается не учитывать.

1) Для трех одножильных кабелей, расположенных треугольником, коэффициенты λ_0, Δ_1 и Δ_2 вычисляют по следующим формулам:

$$\lambda_0 = 3\left(\frac{m^2}{1+m^2}\right)\left(\frac{d}{2s}\right)^2,$$

$$\Delta_1 = \left(1{,}14 m^{2{,}45} + 0{,}33\right)\left(\frac{d}{2s}\right)^{(0{,}92m+1{,}66)},$$

$$\Delta_2 = 0.$$

2) Для трех одножильных кабелей, расположенных в одной плоскости, коэффициенты λ_0, Δ_1 и Δ_2 вычисляют по следующим формулам:

a) для центрального кабеля:

$$\lambda_0 = 6\left(\frac{m^2}{1+m^2}\right)\left(\frac{d}{2s}\right)^2,$$

$$\Delta_1 = 0{,}86 m^{3{,}08}\left(\frac{d}{2s}\right)^{(1{,}4m+0{,}7)},$$

$$\Delta_2 = 0;$$

b) для наружного кабеля, ведущей фазы:

$$\lambda_0 = 1{,}5\left(\frac{m^2}{1+m^2}\right)\left(\frac{d}{2s}\right)^2,$$

$$\Delta_1 = 4{,}7 m^{0{,}7}\left(\frac{d}{2s}\right)^{(0{,}16m+2)},$$

$$\Delta_2 = 21 m^{3{,}3}\left(\frac{d}{2s}\right)^{(1{,}47m+5{,}06)};$$

c) для наружного кабеля, отстающей фазы:

$$\lambda_0 = 1{,}5\left(\frac{m^2}{1+m^2}\right)\left(\frac{d}{2s}\right)^2,$$

$$\Delta_1 = -\frac{0{,}74(m+2)\ m^{0{,}5}}{2+(m-0{,}3)^2}\left(\frac{d}{2s}\right)^{(m+1)},$$

$$\Delta_2 = 0{,}92\ m^{3{,}7}\left(\frac{d}{2s}\right)^{(m+2)}.$$

2.3.6.2 Потери, обусловленные циркулирующими токами

Потери, обусловленные циркулирующими токами, равны нулю для линий с соединением оболочек кабелей в одной точке и при перекрестном соединении оболочек и разделении каждой основной секции на три электрически идентичные малые секции.

Если линия кабелей с перекрестным соединением оболочек содержит секции со значительным дисбалансом, то возникает остаточное напряжение, вызывающее потери вследствие циркулирующих токов в этой секции, которое следует учитывать.

Для линий кабелей, в которых известны фактические длины малых секций, коэффициент потерь λ_1' допускается определять путем умножения коэффициента потерь λ_1' для данной конструкции кабеля (когда оболочки кабелей соединены и заземлены на обоих концах каждой большой секции без перекрестного соединения) на значение, полученное по формуле

$$\frac{p^2+q^2+1-p-pq-q}{(p+q+1)^2}.$$

В любой большой секции кабелей имеются две более длинные малые секции, которые в p и q раз больше длины самой короткой малой секции (т.е. длины малых секций равны a, pa и qa, где a — длина самой короткой малой секции).

Данное выражение показывает только разницу между длинами малых секций.

Необходимо также учитывать любые отклонения в расстоянии между кабелями.

Если длины малых секций не известны, то p следует принять за единицу, а q – 1,2, в результате будет получено значение 0,004.

2.3.7 Двухжильные небронированные кабели в общей оболочке

Для двухжильного небронированного кабеля, изолированные жилы которого заключены в общую металлическую оболочку, коэффициентом потерь λ_1' допускается пренебречь, и коэффициент потерь λ_1'' вычисляют по одной из следующих формул:

- для кабелей с жилами круглого или овального сечения

$$\lambda_1'' = \frac{16\omega^2 10^{-14}}{RR_s}\left(\frac{c}{d}\right)^2\left[1+\left(\frac{c}{d}\right)^2\right],$$

- для кабелей с секторными жилами

$$\lambda_1'' = \frac{10{,}8\ \omega^2 10^{-16}}{RR_s}\left(\frac{1{,}48r_1+t}{d}\right)^2\left[12{,}2+\left(\frac{1{,}48r_1+t}{d}\right)^2\right],$$

где c — расстояние между осью одной жилы и осью кабеля;

r_1 — радиус окружности, описанной вокруг двух фасонных жил кабеля, мм;

d — средний диаметр оболочки кабеля, мм, который для кабелей с овальными жилами выражают как $\sqrt{d_M \cdot d_m}$, где d_M и d_m — максимальный и минимальный средние диаметры оболочки кабеля соответственно; для кабелей с гофрированными оболочками d выражают как $1/2(D_{oc} + D_{it})$.

2.3.8 Трехжильные небронированные кабели в общей оболочке

Для трехжильного небронированного кабеля, изолированные жилы которого заключены в общую металлическую оболочку, значением λ_1' допускается пренебречь, и коэффициент потерь λ_1'' вычисляют по одной из следующих формул:

- для кабелей с круглыми или овальными жилами при значении R_s менее или равном 100 мкОм/м

$$\lambda_1'' = \frac{3R_s}{R}\left[\left(\frac{2c}{d}\right)^2 \frac{1}{1+\left(\frac{R_s}{\omega}10^7\right)^2} + \left(\frac{2c}{d}\right)^4 \frac{1}{1+4\left(\frac{R_s}{\omega}10^7\right)^2}\right];$$

- для кабелей с круглыми или овальными жилами при значении R_s, более 100 мкОм/м

$$\lambda_1'' = \frac{3{,}2\omega^2}{RR_s}\left(\frac{2c}{d}\right)^2 10^{-14};$$

- для кабелей с секторными жилами при любом значении R_s

$$\lambda_1'' = 0{,}94\frac{R_s}{R}\left(\frac{2r_1 + t}{d}\right)^2 \frac{1}{1+\left(\frac{R_s}{\omega}10^7\right)^2},$$

где d — средний диаметр оболочки кабеля, мм, который для кабелей с овальными жилами выражают как $\sqrt{d_M \cdot d_m}$, где d_M и d_m — максимальный и минимальный средние диаметры оболочки кабеля соответственно; для кабелей с гофрированными оболочками d выражают как $1/2(D_{oc} + D_{it})$.

2.3.9 Двухжильные и трехжильные кабели со стальной ленточной броней

Введение стальной ленточной брони приводит к возрастанию потерь в оболочке вследствие вихревых токов. Если кабель имеет стальную ленточную броню, то значения λ_1'', приведенные в 2.3.7 и 2.3.8, следует умножить на коэффициент, вычисленный по формуле

$$\left[1+\left(\frac{d}{d_A}\right)^2 \frac{1}{1+\frac{d_A}{\mu\delta}}\right]^2,$$

где d_A — средний диаметр брони кабеля, мм;

μ — относительная магнитная проницаемость стальной ленточной брони (как правило, значение которой принимают равным 300);

δ — эквивалентная толщина брони кабеля, мм, вычисляемая по формуле

$$\delta = \frac{A}{\pi d_A},$$

где A — площадь поперечного сечения брони кабеля, мм^2.

Данную поправку применяют только к кабелям с ленточной броней толщиной от 0,3 до 1,0 мм.

2.3.10 Бронированные кабели с отдельно освинцованными жилами (типа SL)

Для трехжильного кабеля, каждая изолированная жила которого имеет отдельную свинцовую оболочку, значение λ_1'' равно нулю, и коэффициент потерь λ_1' вычисляют по формуле

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R}\frac{1{,}5}{1+\left(\frac{R_s}{X}\right)^2},$$

где $X = 2\omega\ 10^{-7} \ln\left(\frac{2s}{d}\right)$, Ом/м.

Коэффициент потерь λ_1' для небронированных кабелей, каждая изолированная жила которых имеет отдельную свинцовую оболочку, определяют по 2.3.1.

2.3.11 Потери в экранах и оболочках кабелей, проложенных в трубопроводах

Если каждая жила кабеля в стальном трубопроводе имеет экран только по изоляции, например свинцовую оболочку или медную ленту, то коэффициент потерь λ_1' вычисляют по формуле, приведенной в 2.3.1 для оболочки одножильного кабеля, при условии, что в эту формулу будет внесена поправка на дополнительные потери, вызываемые наличием стальной трубы.

С учетом этой поправки коэффициент потерь λ_1' вычисляют по формуле

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1{,}5}{1+\left(\frac{R_s}{X}\right)^2}.$$

Если каждая изолированная жила имеет оболочку диафрагменного экранного типа и немагнитное защитное усиливающее покрытие, то применяют ту же формулу, при этом сопротивление R_s заменяют параллельной комбинацией сопротивления оболочки и защитного усиливающего покрытия. Диаметр d заменяют величиной d', вычисляемой по формуле

$$d' = \sqrt{\frac{d^2 + d_2^2}{2}},$$

где d' — средний диаметр оболочки и усиливающего покрытия кабеля, мм;

d_2 — средний диаметр усиливающего покрытия кабеля, мм.

Для кабелей с овальными жилами d и d_2 выражают как $\sqrt{d_M \cdot d_m}$, где d_M и d_m — максимальный и минимальный средние диаметры оболочки кабеля соответственно.

Примечание — См. также 2.4.2.

2.4 Коэффициент потерь для брони, защитного усиливающего покрытия и стальных труб для кабелей на переменное напряжение промышленной частоты

По формулам, приведенным в настоящем пункте, вычисляют потери мощности в металлической броне, защитном усиливающем покрытии или стальных трубах через увеличение коэффициента потерь λ_2 во всех жилах кабеля.

Соответствующие значения удельного электрического сопротивления и температурных коэффициентов материалов, используемых для брони и защитного усиливающего покрытия, приведены в таблице 1.

В формулах, приведенных в настоящем пункте, использовано значение сопротивления брони кабеля при максимальной рабочей температуре. Максимальную рабочую температуру брони θ_{ar}, °С, вычисляют по формуле

$$\theta_{ar} = \theta_c - \{(I^2R + 0{,}5W_d)T_1 + [I^2R(1 + \lambda_1) + W_d]nT_2\}.$$

Поскольку температура брони является функцией тока I, то при расчете применяют метод последовательных приближений (итеративный метод).

Сопротивление брони кабеля переменному току при максимальной рабочей температуре R_A, Ом/м, вычисляют по формуле

$$R_A = R_{Ao}[1 + \alpha_{20}(\theta_{ar} - 20)],$$

где R_{Ao} — сопротивление брони кабеля переменному току при температуре 20 °С, Ом/м.

Если применяют параллельно эквивалентное сопротивление оболочки и брони, то можно допустить, что оба элемента имеют рабочую температуру брони, чтобы использовать усредненное значение температурного коэффициента этих материалов.

2.4.1 Кабели с немагнитной броней или защитным усиливающим покрытием

Как правило, потери в защитном усиливающем покрытии кабеля рассчитывают совместно с потерями в оболочке. Применяют формулы, приведенные в 2.3, при этом сопротивление одиночной оболочки R_s заменяют параллельной комбинацией сопротивления оболочки и защитного усиливающего покрытия кабеля. Среднеквадратичное значение диаметра оболочки и защитного усиливающего покрытия заменяют на средний диаметр оболочки d (см. 2.3.11). Данное требование относится к одножильным, двухжильным и многожильным кабелям.

Значение сопротивления защитного усиливающего покрытия зависит от шага наложения лент следующим образом:

a) если ленты наложены с большим шагом (продольное наложение лент), то в расчет принимают сопротивление цилиндра, имеющего ту же массу материала на единицу длины кабеля и тот же внутренний диаметр, что и наложенные ленты;

b) если ленты наложены приблизительно под углом 54° к оси кабеля, то сопротивление в два раза выше значения, определенного в соответствии с перечислением a);

c) если ленты наложены с малым шагом (поперечно наложенные ленты), то сопротивление можно считать бесконечным, т. е. потери допускается не учитывать;

d) если ленты наложены в два или более слоев с малым шагом и ленты примыкают друг к другу, то сопротивление в два раза больше значения, определенного в соответствии с перечислением a).

Данные требования также применяют к кабелям с изолированными жилами, проложенным в трубопроводах, по 2.3.11.

2.4.2 Кабели со стальной броней или усиливающим покрытием

2.4.2.1 Одножильные кабели со свинцовой оболочкой и стальной проволочной броней, соединенной с оболочкой на обоих концах

Приведенный метод не учитывает возможное влияние окружающей среды, которое может быть достаточно существенным, в частности для кабелей, проложенных под водой. Данный метод следует применять для линии с большим расстоянием между кабелями (т. е. 10 м или более). Методом определяют значения общих потерь в оболочке и броне, которые, как правило, больше фактических для того, чтобы номинальные токовые нагрузки были рассчитаны с запасом. Следует учитывать, что наиболее нагретый отрезок кабельной трассы может находиться на берегу, где как потери, так и взаимный нагрев могут быть большими.

Если влиянием окружающей среды можно пренебречь, например при прокладке кабелей на воздухе, то данный метод можно применять для линий с любым расстоянием между кабелями.

Расчет потерь мощности в свинцовой оболочке и стальной проволочной броне одножильных кабелей при соединении оболочки и брони на обоих концах выполняют следующим образом:

a) Эквивалентное сопротивление переменному току оболочки и брони кабеля, соединенных параллельно, R_e, Ом/м, вычисляют по формуле

$$R_e = \frac{R_s \cdot R_A}{R_s + R_A}.$$

Сопротивление проволочной брони переменному току изменяется приблизительно от увеличенного в 1,2 раза сопротивления постоянному току для проволок диаметром 2 мм до увеличенного в 1,4 раза сопротивления постоянному току для проволок диаметром 5 мм. Сопротивление не оказывает определяющего влияния на конечный результат.

b) Индуктивность элементов цепи на фазу H_s, Гн/м, вычисляют по формулам:

$$H_s = 2 \cdot 10^{-7} \ln\left(\frac{2s_2}{d}\right),$$

$$H_1 = \pi\mu_e \left(\frac{n_1 d_f^2}{p d_A}\right) 10^{-7} \sin\beta \cos\gamma,$$

$$H_2 = \pi\mu_e \left(\frac{n_1 d_f^2}{p d_A}\right) 10^{-7} \sin\beta \sin\gamma,$$

$$H_3 = 0{,}4\left(\mu_t \cos^2\beta - 1\right) \left(\frac{d_f}{d_A}\right) 10^{-6}.$$

Примечание — Для несоприкасающихся проволок брони значение H_3 принимают равным нулю,

где H_1, H_2, H_3 — компоненты индуктивности, определяемые стальными проволоками, Гн/м;

s_2 — расстояние между осями соседних кабелей, расположенными треугольником; для кабелей, расположенных в одной плоскости, s_2 — среднее арифметическое значение трех расстояний между кабелями, мм;

d_f — диаметр стальной проволоки, мм;

p — длина шага наложения стальной проволоки вдоль кабеля, мм;

n_1 — число стальных проволок;

β — угол между осью проволок брони и осью кабеля;

γ — угловая временная задержка продольного магнитного потока в стальных проволоках относительно намагничивающей силы;

μ_e — продольная относительная магнитная проницаемость стальных проволок;

μ_t — поперечная относительная магнитная проницаемость стальных проволок.

Значения γ, μ_e, μ_t см. в 2.4.2, перечисление d).

Значения коэффициентов B_1, B_2, Ом/м, вычисляют по следующим формулам:

$$B_1 = \omega(H_s + H_1 + H_3),$$

$$B_2 = \omega H_2.$$

c) Общие потери в оболочке и броне кабеля на единицу длины $W_{(s+A)}$, Вт/м, вычисляют по формуле

$$W_{(s+A)} = I^2 R_e \left(\frac{B_2^2 + B_1^2 + R_e B_2}{(R_e + B_2)^2 + B_1^2} \right).$$

Можно предположить, что потери в оболочке и броне кабеля приблизительно равны, в этом случае коэффициент потерь λ_1' вычисляют по формуле

$$\lambda_1' = \lambda_2 = \frac{W_{(s+A)}}{2W_c},$$

где W_c — потери в жиле кабеля на единицу длины, Вт/м, вычисляемые по формуле $W_c = I^2 R$.

d) Выбор значений γ, μ_e, μ_t

Значения γ, μ_e, μ_t зависят от конкретного образца стали и, если нельзя сослаться на измерения, выполненные на используемой стальной проволоке, то следует принять некоторые средние значения.

Допускается для проволок диаметром от 4 до 6 мм, обладающих прочностью при разрыве около 400 Н/мм^2, принять следующие значения:

$\mu_e = 400$;

$\mu_t = 10$, если проволоки соприкасаются друг с другом;

$\mu_t = 1$, если проволоки не касаются друг друга;

$\gamma = 45°$.

Если требуется более точный расчет и известны характеристики проволоки, то вначале необходимо определить точное значение намагничивающей силы H, ампер-витки/м, для того, чтобы рассчитать соответствующие магнитные характеристики. Значение H, ампер-витки/м, вычисляют по формуле

$$H = \frac{1000 \left| \bar{I} + \bar{I}_s \right|}{\pi d_A},$$

где $\bar{I}$ и $\bar{I}_s$ — векторные значения тока в жиле и тока в оболочке. Для исходного выбора магнитных характеристик достаточно предположить, что $|\bar{I} + \bar{I}_s| = 0{,}6 \cdot I$ и повторить расчеты, если будет установлено, что расчетное значение существенно отличается от предполагаемого.

2.4.2.2 Двухжильные кабели со стальной проволочной броней

Для двухжильных кабелей со стальной проволочной броней коэффициент потерь λ_2 вычисляют по формуле

$$\lambda_2 = \frac{0{,}62\omega^2 10^{-14}}{R \cdot R_A} + \frac{3{,}82 A \omega 10^{-5}}{R} \left[\frac{1{,}48 r_1 + t}{d_A^2 + 95{,}7A} \right]^2.$$

Поправку на неравномерное распределение тока в жилах не учитывают, поскольку это не существенно для жил сечением до 400 мм^2.

2.4.2.3 Трехжильные кабели со стальной проволочной броней

2.4.2.3.1 Кабель с жилами круглого сечения

Для кабелей с жилами круглого сечения коэффициент потерь λ_2 вычисляют по формуле

$$\lambda_2 = 1{,}23 \frac{R_A}{R} \left(\frac{2c}{d_A} \right)^2 \frac{1}{\left(\frac{2{,}77 R_A 10^6}{\omega} \right)^2 + 1}.$$

Поправку на неравномерное распределение тока в жилах не учитывают, поскольку это не существенно для жил сечением до 400 мм^2. Данная формула находится в стадии рассмотрения, так как в ней может быть переоценен коэффициент потерь в броне для некоторых кабельных конструкций.

2.4.2.3.2 Кабели с секторными жилами

Для кабелей с секторными жилами коэффициент потерь λ_2 вычисляют по формуле

$$\lambda_2 = 0{,}358\frac{R_A}{R}\left(\frac{2r_1}{d_A}\right)^2 \frac{1}{\left(\frac{2{,}77R_A10^6}{\omega}\right)^2 + 1}.$$

2.4.2.4 Трехжильные кабели со стальной ленточной броней или усиливающим покрытием

Приведенную ниже формулу применяют для кабелей с лентами толщиной 0,3—1,0 мм.

Коэффициент гистерезисных потерь λ_2' при частоте 50 Гц вычисляют по формуле

$$\lambda_2' = \frac{s^2k^210^{-7}}{Rd_A\delta},$$

где δ — эквивалентная толщина брони кабеля, мм, вычисляемая по формуле

$$\delta = \frac{A}{\pi d_A}.$$

Коэффициент k вычисляют по формуле

$$k = \frac{1}{1+\frac{d_A}{\mu\delta}},$$

где μ — относительная магнитная проницаемость стальной ленты, значение которой, как правило, принимают равным 300.

Для частот f, отличных от 50 Гц, значение k, полученное по вышеприведенной формуле, следует умножить на коэффициент $\frac{f}{50}$.

Коэффициент потерь на вихревые токи λ_2'' при частоте 50 Гц вычисляют по формуле

$$\lambda_2'' = \frac{2{,}25s^2k^2\delta10^{-8}}{Rd_A}.$$

При любой другой частоте значение, полученное по формуле, следует умножить на коэффициент $\left(\frac{f}{50}\right)^2$.

Общий коэффициент потерь λ_2 вычисляют как сумму потерь на вихревые токи и гистерезисных потерь в броне кабеля по формуле

$$\lambda_2 = \lambda_2' + \lambda_2''.$$

Примечание — Следует учитывать, что стальная магнитная броня или защитное усиливающее покрытие, при наличии, увеличивают потери в оболочках, обусловленные вихревыми токами (см. 2.3.9).

2.4.2.5 Кабели типа SL с отдельно освинцованными жилами

Если броня наложена на кабель типа SL с отдельно освинцованными жилами, то экранирующий эффект токов в оболочке способствует снижению потерь в броне. Значения коэффициента λ_2, полученные по формуле, приведенной в 2.4.2.3.1 или 2.4.2.3.2, следует умножить на коэффициент $\left(1-\frac{R}{R_s}\lambda_1'\right)$, где коэффициент потерь λ_1' определен по 2.3.1.

2.4.3 Кабели, проложенные в стальных трубах

Потери для кабелей, проложенных в стальных трубах, определяют по двум эмпирическим формулам, по одной из которых вычисляют потери для кабелей, у которых жилы расположены треугольником вплотную друг к другу, а по другой — для кабелей, у которых жилы расположены в виде открытой конфигурации (в лотках) на дне трубы. На практике для кабелей с изолированными жилами применяют

конфигурацию, представляющую собой нечто среднее между этими двумя способами расположения. Следует вычислить потери для кабелей каждой конфигурации расположения жил и определить среднее значение.

Примечание — Приведенные ниже формулы получены эмпирическим путем в США, и их применяют только для кабелей, проложенных в трубах размерами и из типа стали, используемых в этой стране.

Коэффициент потерь λ_2 для кабелей с жилами, расположенными треугольником вплотную друг к другу, вычисляют по формуле

$$\lambda_2 = \left(\frac{0{,}0115s - 0{,}001485\ d_d}{R} \right) 10^{-5}.$$

Коэффициент потерь λ_2 для кабелей с жилами, расположенными в виде открытой конфигурации (в лотках) на дне трубы, вычисляют по формуле

$$\lambda_2 = \left(\frac{0{,}00438s + 0{,}00226d_d}{R} \right) 10^{-5},$$

где d_d — внутренний диаметр трубы, мм.

Приведенные формулы справедливы при частоте 60 Гц. Для частоты 50 Гц полученные значения следует умножить на 0,76.

Для кабелей, проложенных в трубах, с броней из плоских проволок на всех трех изолированных жилах потери не зависят от наличия трубы. Потери в броне таких кабелей следует рассчитывать как для кабелей с отдельно освинцованными жилами (см. 2.4.2.5), а потери в трубах в этом случае не учитывают. Значения коэффициента поглощения солнечного излучения поверхностью кабеля σ приведены в таблице 4.

Таблица 4 — Коэффициент поглощения солнечного излучения поверхностью кабеля

Материал	σ
Битумно-джутовое покрытие	0,8
Полихлоропрен	0,8
ПВХ	0,6
ПЭ	0,4
Свинец	0,6

Приложение ДА
(справочное)

Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов национальным и межгосударственным стандартам

Таблица ДА.1

Обозначение ссылочного международного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование соответствующего национального, межгосударственного стандарта
IEC 60027-3	IDT	ГОСТ Р МЭК 60027-3—2016 «Государственная система обеспечения единства измерений. Обозначения буквенные, применяемые в электротехнике. Часть 3. Логарифмические и относительные величины и единицы измерений»
IEC 60028:1925	—	*
IEC 60141-1	—	*
IEC 60141-2	—	*
IEC 60141-3	—	*
IEC 60141-4	—	*
IEC 60228	MOD	ГОСТ 22483—2021 «Жилы токопроводящие для кабелей, проводов и шнуров»
IEC 60287-2-1	IDT	ГОСТ Р МЭК 60287-2-1—2009 «Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 2-1. Тепловое сопротивление. Расчет теплового сопротивления»
IEC 60502-1	IDT	ГОСТ 31996—2012 «Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение 0,66; 1 и 3 кв. Общие технические условия»
IEC 60502-2	NEQ	ГОСТ Р 55025—2012 «Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение от 6 до 35 кВ включительно. Общие технические условия»
IEC 60889	—	*

* Соответствующий национальный стандарт отсутствует. До его принятия рекомендуется использовать перевод на русский язык данного международного стандарта.

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

- IDT— идентичные стандарты;
- MOD — модифицированный стандарт;
- NEQ — неэквивалентный стандарт.

УДК 621.315.326.001.4:006.354 ОКС 29.060.20

Ключевые слова: кабель электрический, номинальные токовые нагрузки, методы расчета номинальной токовой нагрузки, расчет потерь, общие положения

Редактор *Н.А. Аргунова*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *М.И. Першина*
Компьютерная верстка *Е.О. Асташина*

Сдано в набор 27.05.2022. Подписано в печать 21.06.2022. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 3,72. Уч.-изд. л. 3,34.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «РСТ»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru