Библиотека электромонтера

Ф. Ф. Карпов

Как выбрать сечение проводов и кабелей

Госэнергоиздат

БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

Выпуск 1

Ф. Ф. КАРПОВ

КАК ВЫБРАТЬ СЕЧЕНИЕ ПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1959 ЛЕНИНГРАД

ЭЭ-3-3

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:
Демков Е. Д., Долгов А. Н., Ежков В. В., Смирнов А. Д., Устинов П. И.

В книге приведены в доступной форме указания и расчеты, необходимые для выбора сечения проводов и кабелей простейших разомкнутых электросетей до 500 в. Пояснения методов расчета сопровождаются решениями числовых примеров.

Назначение книги — служить пособием электромонтеру при монтаже и эксплуатации электрических сетей промышленных предприятий, колхозов и совхозов, жилых домов и поселков.

Автор *Федор Федорович Карпов*

КАК ВЫБРАТЬ СЕЧЕНИЕ ПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ

* * *

Редактор *Е. Д. Демков* Техн. редактор *Г. Е. Ларионов*

Сдано в пр-во 2/XII 1958 г. Подписано к печати 17/II 1959 г.
Формат бумаги 84×108$^{1}/_{32}$ 2,46 п. л. Уч.-изд. л. 3
Т-02806 Тираж 30 000 Цена 1 р. 50 к. Зак. 1534

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ОТ ИЗДАТЕЛЬСТВА

Необходимость выпуска литературы для многочисленного отряда электромонтеров, ведущих ответственную работу по электрификации народного хозяйства нашей Родины, в последние годы чувствуется очень остро.

Госэнергоиздат приступает к выпуску «Библиотеки электромонтера» и выражает уверенность, что массовое распространение электротехнических знаний среди рабочих, бригадиров и мастеров будет способствовать выполнению исторических задач по строительству коммунизма, принятых XXI съездом КПСС.

В «Библиотеку электромонтера» войдут брошюры как для квалифицированных монтеров, имеющих большой практический опыт, так и для монтеров, имеющих необходимую теоретическую подготовку, но не имеющих достаточного опыта работы.

Цель этой библиотеки—объяснить, как работают электрические устройства и аппараты, показать, как выполняются простейшие электротехнические расчеты, почему в данных условиях приняты те или иные решения в части конструкций, схем и методов монтажа и эксплуатации, а также отразить передовой опыт изобретателей и рационализаторов по монтажу, наладке и эксплуатации электротехнических установок.

Издательство просит читателей присылать в редакцию свои замечания по вышедшим брошюрам и предложения о желательной тематике «Библиотеки электромонтера».

Предложения об издании брошюр вместе с кратким их содержанием следует направлять по адресу: Москва Ж-114, Шлюзовая набережная, д. 10. Госэнергоиздат, «Библиотека электромонтера».

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 5
1. С какой целью написана эта книга 5
2. Каким требованиям должна удовлетворять электрическая сеть 5
Расчетная схема сети 6
1. Для чего нужна расчетная схема и как ее составить . . 6
2. Определение расчетных нагрузок 8
Как выбрать сечение провода или кабеля по условию его нагревания и защиты от перегрузки 11
1. Допустимые нагрузки на провода и кабели 11
2. Выбор плавких предохранителей и автоматических выключателей 14
3. Выбор сечения проводов и кабелей по условию нагревания 20
Как определить сечение проводов или кабелей по условию допустимой потери напряжения 26
1. Почему электрическую сеть нужно рассчитывать на потерю напряжения 26
2. Основные понятия о расчете сети на потерю напряжения 28
3. Как определить сечение проводов и кабелей по допустимой потере напряжения без учета индуктивного сопротивления линии 30
4. Как определить сечение проводов и кабелей по допустимой потере напряжения с учетом индуктивного сопротивления линии 36
Приложение. Справочные таблицы 41

ВВЕДЕНИЕ

1. С какой целью написана эта книга

При монтаже и эксплуатации электрических сетей низкого напряжения монтеру часто приходится самостоятельно решать вопрос о выборе сечения проводов и кабелей.

Настоящая книга ставит своей целью помочь монтеру правильно решить задачу о выборе сечения проводов и кабелей разомкнутых силовых и осветительных сетей напряжением до 500 *в*. Сюда относятся внутренние осветительные электропроводки жилых домов и общественных зданий, силовые и осветительные сети промышленных предприятий, наружные сети жилых поселков, колхозов и совхозов.

2. Каким требованиям должна удовлетворять электрическая сеть

а) *Всякая электрическая сеть должна быть безопасной для жизни и здоровья людей и не создавать угрозы возникновения пожара или взрыва.* Одним из необходимых условий безопасности электрической сети является правильный выбор сечения проводов и кабелей по условию их нагревания и защиты от перегрузки.

б) *Электрическая сеть должна обладать достаточной надежностью, т. е. не допускать перебоев в питании электроэнергией присоединенных к ней потребителей.*

Одним из условий обеспечения надежности электропроводки является достаточная механическая прочность проводов. Чем больше расстояние между точками крепления провода, тем прочнее должен быть провод. Особенно большим механическим нагрузкам подвергаются провода наружной электросети (ветер, гололед). Поэтому при выборе сечения проводов необходимо руководствоваться табл. 1 приложения, в которой приведены для различных условий

168—2

прокладки минимальные сечения проводов, обеспечивающие достаточную механическую прочность.

в) *Электрическая сеть должна быть выполнена так, чтобы по ней можно было передавать потребителям энергию хорошего качества.*

Основным показателем хорошего качества электроэнергии является возможно меньшее отклонение напряжения на зажимах приемника от номинального.

Всякий приемник электрической энергии (лампа накаливания, электродвигатель, телевизор, и т. п.) рассчитывается на определенное номинальное напряжение. Отклонение напряжения от номинального вызывает ухудшение работы приемника.

Напряжение в различных точках сети зависит в значительной степени от сечения проводников, из которых выполнена эта сеть. Отсюда становится понятной необходимость такого выбора сечений проводников электросети, чтобы была обеспечена для всех потребителей сети работа при напряжении, возможно более близком к номинальному. Это достигается расчетом сети на потерю напряжения.

РАСЧЕТНАЯ СХЕМА СЕТИ

1. Для чего нужна расчетная схема и как ее составить

Для выбора сечения проводников отдельных участков сети по условиям нагревания необходимо знать нагрузку этих участков, а для расчета на потерю напряжения, кроме того, еще и длину каждого участка. Отсюда ясно, что начинать расчет электросети следует с составления расчетной схемы.

Наибольшее распространение имеет четырехпроводная сеть трехфазного тока напряжением 380/220 *в*. В такой сети электродвигатели подключаются к трем фазным проводам с междуфазным (линейным) напряжением 380 *в*. Осветительные лампы и бытовые приборы включаются между фазным и нулевым проводами на фазное напряжение 220 *в*. Нейтраль сети 380/220 *в* глухо заземляется, благодаря чему эта сеть относится к сетям низкого напряжения, для которых напряжение между фазным проводом и землей не превосходит 250 *в*.

На рис. 1 показана четырехпроводная линия на напряжение 380/220 *в*. К этой линии присоединены два электродвигателя на 380 *в* и группа ламп на 220 *в*. Лампы имеют

одинаковую мощность и распределены поровну между всеми тремя фазами линии.

При этих условиях каждая фаза линии будет нагружена одинаково, т. е. в проводах всех трех фаз будут протекать одинаковые токи, суммарное значение которых будет равно нулю, и в нулевом проводе ток будет отсутствовать.

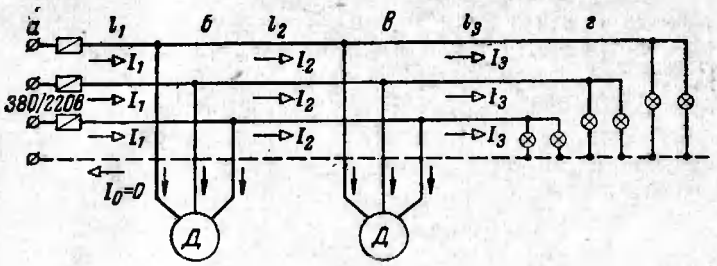

Рис. 1.

Благодаря этому трехлинейную схему рис. 1 можно заменить однолинейной расчетной схемой, изображенной на рис. 2, на которой должны быть указаны длины всех участков сети, нагрузки всех потребителей, а также места расположения предохранителей и автоматов.

Удобнее всего при составлении расчетной схемы пользоваться планом и разрезом помещения или планом поселка,

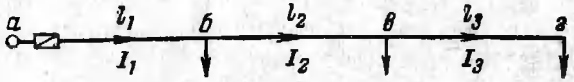

Рис. 2.

на которых нанесена сеть и указаны все присоединенные к ней нагрузки.

Длины всех участков сети замеряются по чертежу с учетом масштаба, в котором он вычерчен. Если плана помещения или поселка нет, нужно длины всех участков сети измерить в натуре.

При составлении расчетной схемы соблюдение масштаба не обязательно. Важно лишь придерживаться правильного взаимного расположения на схеме защитных аппаратов и нагрузок.

2. Определение расчетных нагрузок

Осветительная лампа, электроплитка и радиоприемник потребляют при заданном напряжении вполне определенную мощность.

При номинальном напряжении такой приемник забирает из сети номинальную мощность, которая указывается заводом-изготовителем в его паспорте в ваттах или киловаттах. Именно эта номинальная мощность и принимается в качестве расчетной для приемников такого типа.

К другому типу приемников принадлежит электродвигатель. Здесь также на табличке, прикрепленной к корпусу двигателя, указывается его номинальная мощность. Фактическая мощность, забираемая им из сети, зависит от его механической нагрузки, т. е. от мощности приводимого механизма: станка, насоса, транспортера и т. п. При правильном подборе номинальные мощности электродвигателя и приводимого механизма должны быть равны и тогда двигатель используется наилучшим образом. Но на практике двигатель часто оказывается загруженным неполностью. При определении расчетной мощности, кроме степени загрузки двигателя, следует также учитывать потери на нагревание его обмоток и магнитопровода и потери на трение в подшипниках.

Таким образом, расчетная мощность линии, питающей электродвигатель, отличается от номинальной мощности электродвигателя, которая по отношению к сети носит название *установленной* мощности. Эта разница должна быть учтена при расчете линии, так как необходимо выбрать провода без излишнего запаса и в то же время так, чтобы они удовлетворяли техническим требованиям.

Представим себе теперь, что нужно определить расчетную нагрузку для линии, питающей мастерскую, в которой установлено 25 электродвигателей. Из работающих электродвигателей только некоторые (например, вентиляторы) будут работать непрерывно, остальные будут останавливаться на время, пока рабочий не укрепит новую деталь для обработки. Часть двигателей может работать с неполной нагрузкой или быть в ремонте и т. д. Для определения действительной расчетной нагрузки применяют *коэффициент спроса* k_c, величина которого зависит от характера производства, степени использования имеющегося оборудования, общего количества электродвигателей и т. п. Коэффициент спроса k_c определяется как

отношение забираемой из сети мощности и установленной мощности приемников[1]:

$$k_c = \frac{P}{P_{уст}}.$$

Коэффициент спроса может относиться как к одному приемнику, так и к целому дому или группе домов, цеху или заводу.

В следующей ниже таблице приведены примерные значения коэффициентов спроса, для различных видов нагрузки.

Характеристика потребителя	Значение коэффициента спроса
А. Осветительные установки	
Торговые и мелкие производственные помещения, жилые дома с площадью до 150 м², сеть наружного освещения	1,0
Крупные и средние производственные здания	0,85—0,95
Большие жилые дома и здания общественного назначения	0,8—0,9
Уличная магистраль в поселке или селе	0,7—0,8
Б. Силовые установки	
При числе электродвигателей до 3	0,7—1,0
При числе электродвигателей 4—8	0,45—0,75
При числе электродвигателей 9—20	0,25—0,5
При числе электродвигателей свыше 20	0,2—0,4

Зная общую установленную мощность токоприемников $P_{уст}$ и выбрав в зависимости от характера установки коэффициент спроса, находят расчетную нагрузку:

$$P = k_c P_{уст}. \qquad (1)$$

Подсчитанные таким образом нагрузки указывают в ваттах или киловаттах возле стрелок, изображающих эти нагрузки на расчетной схеме. Такая схема достаточна для расчета сети на потерю напряжения, но при выборе сечения по условию нагревания необходимо определить расчетную длительную нагрузку в амперах. Кроме того, для выбора

[1] Установленной мощностью группы приемников называется сумма номинальных мощностей этих приемников.

аппарата защиты необходимо определить также величину пускового тока электродвигателя.

Величина расчетного тока I однофазного приемника при включении его в двухпроводную сеть переменного тока определяется по формуле

$$I = \frac{P}{U_н \cos \varphi}, \qquad (2)$$

где P — расчетная нагрузка, *вт*;

$U_н$ — номинальное напряжение на зажимах приемника, *в*;

$\cos \varphi$ — коэффициент мощности приемника.

Коэффициент мощности для ламп накаливания и нагревательных приборов равен 1, и для таких приемников

$$I = \frac{P}{U_н}. \qquad (3)$$

Для определения тока нагрузки любого приемника сети постоянного тока служит также формула (3).

Для приемников, имеющих индуктивность (катушки со стальными сердечниками) $\cos \varphi$ меньше 1 и определяется по каталогу или по паспорту приемника.

Пример 1. К однофазной линии наружного освещения напряжением 220 *в* присоединено 20 светильников с лампами накаливания мощностью по 200 *вт*. Определить, какой ток протекает в начале линии?

Решение. Коэффициент спроса для линии наружного освещения равен 1, и расчетная нагрузка линии составит:

$$P = k_c P_{уст} = 1(20 \cdot 200) = 4\,000 \ вт.$$

Для ламп накаливания коэффициент мощности равен 1. Расчетный ток определяем по формуле (3)

$$I = \frac{P}{U_н} = \frac{4\,000}{220} = 18{,}2 \ а.$$

Для трехфазных приемников сети переменного тока, главным из которых является электродвигатель, величина расчетного тока в проводе равна

$$I = \frac{P}{1{,}73\, U_н \cos \varphi}, \qquad (4)$$

где $U_н$ — междуфазное (линейное) номинальное напряжение приемника, *в*;

$\cos \varphi$ — коэффициент мощности приемника.

Этой же формулой можно пользоваться при определении тока для однофазных приемников при равномерной нагрузке фаз, если под P подразумевать суммарную мощность всех трех фаз.

Величина пускового тока электродвигателя $I_{пуск}$ определяется умножением его номинального тока $I_{н.дв}$ на кратность пускового тока k_i:

$$I_{пуск} = k_i I_{н.дв}. \qquad (5)$$

Величины $I_{н.дв}$ и k_i следует брать из каталога или справочника. Кратность пускового тока k_i показывает, во сколько раз пусковой ток электродвигателя больше его номинального тока.

При определении тока магистрали, питающей группу приемников, пользуются теми же формулами, подставляя в них среднее значение коэффициента мощности $\cos\varphi_{ср}$.

Пример 2. Трехфазная линия с междуфазным напряжением $U_н = 380$ *в* питает деревообделочную мастерскую, в которой установлено 15 электродвигателей общей мощностью $P_{уст} = 43$ *квт*. Средний коэффициент мощности установки $\cos\varphi_{ср} = 0{,}8$ и коэффициент спроса $k_c = 0{,}3$. Определить расчетный ток линии.

Решение. По формуле (1) находим расчетную нагрузку линии в киловаттах:

$$P = k_c P_{уст} = 0{,}3 \cdot 43 = 12{,}9 \text{ квт}.$$

Расчетный ток определяем по формуле (4):

$$I = \frac{P}{1{,}73 U_н \cos\varphi_{ср}} = \frac{12{,}9 \cdot 1\,000}{1{,}73 \cdot 380 \cdot 0{,}8} = 24{,}5 \text{ а}$$

(коэффициент 1 000 введен для перевода мощности из киловаттов в ватты).

КАК ВЫБРАТЬ СЕЧЕНИЕ ПРОВОДА ИЛИ КАБЕЛЯ ПО УСЛОВИЮ ЕГО НАГРЕВАНИЯ И ЗАЩИТЫ ОТ ПЕРЕГРУЗКИ

1. Допустимые нагрузки на провода и кабели

При включении линии с нагрузкой по проводникам протекает ток, нагревающий токоведущие жилы проводников. Одновременно происходит отвод тепла от проводников в окружающую среду. Через некоторое время токоведущие жилы проводника достигают постоянной температуры, если протекающий по ним ток не изменяется.

Предельная температура проводов и кабелей ограничивается условиями надежности, экономичности и безопасности проводки. Излишне высокая температура изолированного провода или кабеля вызывает быстрый износ и сокращение срока службы проводки. В воздушных сетях перегревание вызывает сильное провисание проводов и может послужить причиной их схлестывания и отключения линии защитой.

Особенно опасным является перегревание изоляции для пожароопасных или взрывоопасных помещений, где ее воспламенение может вызвать пожар или взрыв.

Отсюда становится ясной необходимость ограничения величины токовой нагрузки на проводник заданного сечения с таким расчетом, чтобы максимальная температура жилы проводника не превышала определенного предела. Допустимая токовая нагрузка зависит от сечения, конструкции проводника и условий его охлаждения.

В приложении в табл. 2—5 даны допустимые длительные токовые нагрузки голых и изолированных проводов и кабелей для нормальных условий прокладки. *Нормальными условиями прокладки* на воздухе считаются прокладки любого количества проводов или кабелей на расстоянии между ними в свету не менее 35 *мм* (при прокладке в каналах не менее 50 *мм*) и при температуре окружающего воздуха +25° С. Для проложенных в земле кабелей нормальными условиями считаются прокладка в траншее одного кабеля при температуре почвы +15° С.

Пример 3. Найти допустимую длительную нагрузку для голого медного и алюминиевого проводов сечением 25 *мм*^{2} при прокладке их на открытом воздухе и при температуре воздуха +25° С.

Решение. Из табл. 2 находим допустимую токовую нагрузку в нормальных условиях для медного провода 180 *а* и для алюминиевого 135 *а*. Хотя сечение проводов одинаково, но допустимые нагрузки для них различны, так как алюминиевый провод имеет бо́льшее сопротивление и нагревается сильнее.

Пример 4. Определить допустимую нагрузку для алюминиевого провода с резиновой изоляцией сечением 6 *мм*^{2} при открытой прокладке и при прокладке трех проводов в одной трубе.

Решение. Из табл. 4 находим допустимую токовую нагрузку на провод в нормальных условиях при открытой прокладке 35 *а* и при прокладке трех проводов в одной трубе 28 *а*. При прокладке в трубе допустимая токовая нагрузка снижается из-за ухудшения условий охлаждения проводов.

Когда условия прокладки проводов и кабелей отличаются от нормальных, допустимую токовую нагрузку $I_{доп}$

определяют умножением взятой из табл. 2—5 допустимой токовой нагрузки для нормальных условий $I_{н.доп}$ на *поправочный коэффициент* $k_{попр}$, учитывающий изменения условий охлаждения проводки

$$I_{доп} = k_{попр} I_{н.доп}. \qquad (6)$$

В некоторых случаях температура окружающей среды может значительно отличаться от принятой за нормальную. Чем выше температура среды, окружающей проводку, тем хуже условия охлаждения проводов и кабелей. Поправочные коэффициенты, учитывающие фактическую температуру земли и воздуха, в которых находятся провода или кабели, даны в табл. 6. Кроме того, для кабелей, проложенных в земле в одной траншее, вводится коэффициент, учитывающий количество кабелей (см. табл. 7). Чем больше кабелей проложено в одной траншее, тем хуже условия их охлаждения.

Следует отметить, что резервные кабели, которые нормально отключены, не принимаются во внимание, так как в них не происходит выделение тепла.

В тех случаях, когда условия работы проводки требуют введения нескольких поправок, общий поправочный коэффициент определяется перемножением отдельных коэффициентов.

Пример 5. На юге Средней Азии в общей траншее при температуре почвы +25° С проложены при расстоянии в свету между ними 200 *мм* восемь трехжильных кабелей с бумажной изоляцией, марки ААБ, на напряжение до 1 *кв*, сечением 120 *мм*². Определить допустимую нагрузку на каждый кабель, если два из восьми кабелей находятся в резерве.

Решение. Из табл. 5 находим допустимую токовую нагрузку на кабель при условии прокладки одного кабеля в траншее при температуре почвы +15° С:

$$I_{н.доп} = 300 \ a.$$

Для кабелей с бумажной изоляцией до 1 *кв* максимальная допустимая температуры жилы 80° С. Из табл. 6 находим значение поправочного коэффициента для расчетной температуры среды 15° С при фактической температуре 25° С:

$$k_{1попр} = 0{,}92.$$

Из табл. 7 для шести несущих нагрузку кабелей, проложенных в одной траншее с расстоянием в свету 200 *мм*, находим величину второго поправочного коэффициента:

$$k_{2попр} = 0{,}81.$$

Значение общего поправочного коэффициента:

$$k_{попр} = 0{,}92 \cdot 0{,}81 = 0{,}745.$$

Величина допустимой токовой нагрузки на кабель с учетом ухудшения условий охлаждения

$$I_{доп} = 0{,}745 \cdot 300 = 224 \ а.$$

2. Выбор плавких предохранителей и автоматических выключателей

При выборе электродвигателя и определении его рабочего тока исходят из нормальных условий работы приводимого механизма (станок, насос, транспортер и т. п.). Но для многих механизмов не исключена возможность перегрузки, при которой электродвигатель и питающая его линия будут иметь ток больше расчетного. Кроме того, при повреждении электродвигателя или питающей его линии может возникнуть короткое замыкание, при котором ток в обмотках электродвигателя и в линии очень сильно возрастает.

Отсюда ясна необходимость защиты электродвигателя и проводов линии от перегрузок и коротких замыканий.

В установках низкого напряжения для защиты от перегрузок и коротких замыканий применяются плавкие предохранители, максимальные автоматы и магнитные пускатели с тепловыми реле. Предохранитель, автомат или пускатель характеризуются *номинальным напряжением и номинальным током* и выбираются по каталогу или справочнику в зависимости от напряжения сети, в которой они устанавливаются, и от максимального длительного тока, который через них протекает [1].

Защитным элементом предохранителя является плавкая вставка, а автомата — расцепитель. Как плавкая вставка, так и расцепитель характеризуются прежде всего номинальным током, т. е. током, на длительное протекание которого они рассчитаны.

Если ток, протекающий через предохранитель или автомат, будет увеличиваться, то при некоторой его величине плавкая вставка предохранителя расплавится, а расцепитель автомата сработает и отключит автомат. Таким же образом при перегрузке магнитный пускатель отключается

[1] См., например, Н. А. Славченко, Справочник энергетика городских электростанций, электрических и тепловых сетей, Москва, 1957.

тепловыми реле. Благодаря этому приемник электрической энергии и линия, на которой установлен предохранитель или автомат, будут защищены от протекания токов, бо́льших, чем ток плавления вставки предохранителя или чем ток срабатывания расцепителя автомата или теплового реле пускателя.

Как же выбрать плавкую вставку предохранителя?

При включении почти всякого приемника электроэнергии в сети возникает кратковременный толчок пускового тока, превышающий номинальный ток приемника. Опытом установлено, что если *кратность пускового тока каждого из присоединенных к линии приемников не превосходит 2,5, то плавкую вставку можно выбирать по длительному расчетному току линии, не считаясь с толчками пускового тока*, которые при этих условиях не успевают расплавить вставки. В этом случае номинальный ток плавкой вставки $I_{н.вст}$ должен быть равен или больше длительного расчетного тока линии $I_{дл}$:

$$I_{н.вст} \geqslant I_{дл}. \qquad (7)^*$$

При прямом включении короткозамкнутых электродвигателей возникают пусковые токи, превышающие номинальные токи этих электродвигателей в 4—6 раз.

Если выбрать для защиты такого электродвигателя плавкую вставку по расчетному длительному току, то она сгорит при пуске электродвигателя.

Для короткозамкнутого электродвигателя, кратность пускового тока которого k_i больше 2,5, номинальный ток плавкой вставки не должен быть меньше пускового тока ($I_{пуск}$), деленного на 2,5:

$$I_{н.вст} \geqslant \frac{I_{пуск}}{2{,}5}. \qquad (8)$$

Выбор плавкой вставки для линии, питающей установку с несколькими короткозамкнутыми электродвигателями, производится из двух условий: из условия длительной расчетной нагрузки линии по формуле (7) и из условия максимального кратковременного тока линии ($I_{макс.кр}$) по формуле (9):

$$I_{н.вст} \geqslant \frac{I_{макс.кр}}{2{,}5} = \frac{I'_{дл} + I_{пуск}}{2{,}5}, \qquad (9)$$

---

* В формуле (7) знак ($\geqslant$) указывает, что $I_{н.вст}$ должно быть либо больше ($>$) либо равно ($=$) $I_{дл}$.

где $I_{пуск}$ — пусковой ток электродвигателя, для которого разность $\left(\frac{I_{пуск}}{2,5} - I_{дл.дв}\right)$ является наибольшей;

$I'_{дл}$ — наибольший длительный расчетный ток линии без учета длительного тока пускаемого электродвигателя.

Номинальный ток плавкой вставки выбирают по большей из величин, определенных по формулам (7) и (9).

Если возможен одновременный пуск нескольких электродвигателей, в формулу (9) подставляют суммарный пусковой ток ($I_{пуск}$) этих электродвигателей.

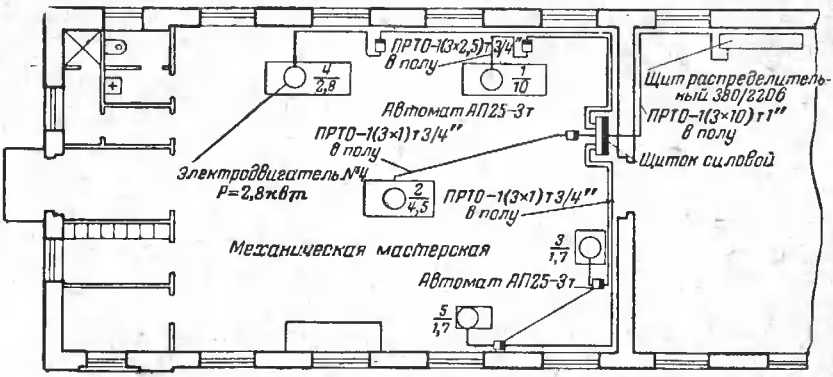

Рис. 3.

При выборе плавких вставок, расставленных в линии последовательно, нужно соблюдать еще одно правило. Предохранитель, более удаленный от потребителя, следует выбирать по крайней мере на одну ступень выше по величине номинального тока. Благодаря этому достигается избирательность (селективность) защиты, т. е. перегорание плавкой вставки того предохранителя, который расположен ближе к месту повреждения.

Пример 6. Выбрать предохранители силовой сети напряжением 380 *в* небольшой механической мастерской, в которой установлено пять электродвигателей. На рис. 3 представлен план мастерской с нанесением электрической сети и с указанием расположения электродвигателей, распределительного щитка и защитных автоматов.

Технические данные установленных электродвигателей приведены в столбцах 1—5 следующей ниже таблицы. В столбце 6 приведено значение коэффициента спроса для каждого электродвигателя.

Тип электродвигателя	Мощность, *квт*	Номинальный ток, *а*	Коэффициент мощности cos φ	Кратность пускового тока k_i	Коэффициент спроса k_c	Расчетный длительный ток, *а*	Пусковой ток, *а*
А62-6	10	21,5	0,82	4,5	1,0	18,5	96,8
А52-6	4,5	10,1	0,8	5,5	1,0	8,5	55,5
А41-4	1,7	3,9	0,82	5	0,9	2,8	19,5
А42-4	2,8	6,1	0,84	5,5	0,9	4,6	33,6
А41-4	1,7	3,9	0,82	5	0,85	2,7	19,5

В мастерской могут работать одновременно не более четырех двигателей. Одновременного пуска двух и более двигателей не бывает.

Р е ш е н и е. Составляем расчетную схему (рис. 4), на которой указываем расположение предохранителей и автоматов и измеренные

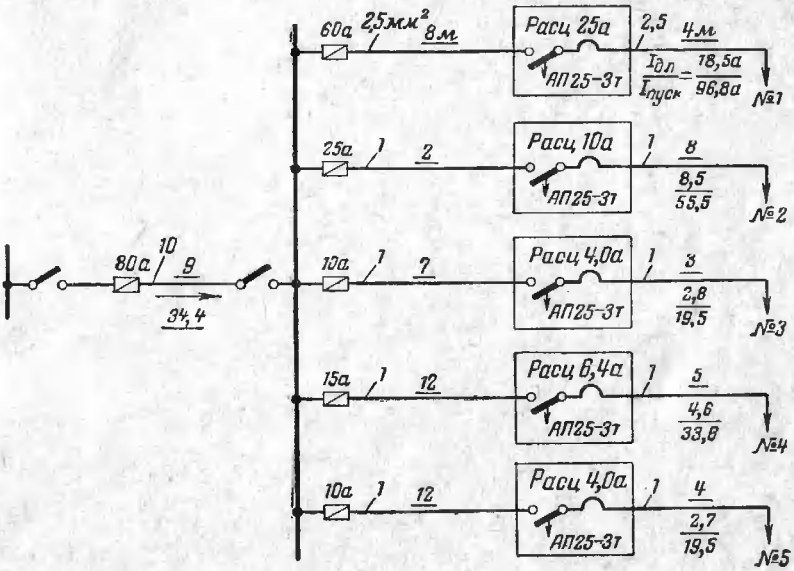

Рис. 4.

по плану длины всех участков линии. Нагрузку электродвигателей указываем стрелками. Определяем расчетные нагрузки. Для электродвигателя № 1 расчетная нагрузка по формуле (1):

$$P = k_c P_{уст} = 1 \cdot 10 = 10 \ квт.$$

Величину расчетного длительного тока электродвигателя определяем по формуле (4), где $P = 10\,000$ *вт*, $U_н = 380$ *в* и $\cos\varphi = 0{,}82$:

$$I_{дл.дв} = \frac{10\,000}{1{,}73 \cdot 380 \cdot 0{,}82} = 18{,}5 \ а.$$

Кратность пускового тока электродвигателя № 1 $k_i = 4{,}5$, и его номинальный ток $I_{н.дв} = 21{,}5$ *а*, откуда находим пусковой ток электродвигателя по формуле (5)

$$I_{пуск} = 4{,}5 \cdot 21{,}5 = 96{,}8 \text{ а}.$$

Так как кратность пускового тока двигателя № 1 больше 2,5, то номинальный ток плавкой вставки предохранителя подсчитываем по формуле (8)

$$I_{н.вст} \geqslant \frac{I_{пуск}}{2{,}5} = \frac{96{,}8}{2{,}5} = 38{,}7 \text{ а}.$$

Выбираем плавкую вставку на номинальный ток 60 *а*, так как плавкая вставка на 35 *а* может перегореть при пуске электродвигателя. Подобным же образом производим подсчет длительного и пускового токов остальных электродвигателей мастерской и выбор для них плавких вставок. Результаты заносим в таблицу и указываем на расчетной схеме рис. 4. Выбор предохранителя на питающей мастерскую магистрали следует производить по формулам (7) и (9). В нашем случае длительный ток с учетом одновременной работы четырех наиболее крупных электродвигателей равен 34,4 *а*.

Из формулы (7) находим номинальный ток плавкой вставки

$$I_{н.вст} \geqslant I_{дл} = 34{,}4 \text{ а}.$$

Для электродвигателя № 1 величина разности

$$\frac{I_{пуск}}{2{,}5} - I_{дл.дв} = \frac{96{,}8}{2{,}5} - 18{,}5 = 20{,}2 \text{ а}$$

является наибольшей.

Длительный ток линии за вычетом тока электродвигателя № 1

$$I'_{дл} = 34{,}4 - 18{,}5 = 15{,}9 \text{ а}.$$

По формуле (9) находим номинальный ток плавкой вставки из условия наибольшего кратковременного тока:

$$I_{н.вст} = \frac{I'_{дл} + I_{пуск}}{2{,}5} = \frac{15{,}9 + 96{,}8}{2{,}5} = 45{,}1 \text{ а}.$$

Как видим, было бы достаточно принять плавкую вставку на 60 *а*. Но тогда при повреждении электродвигателя № 1 вместо вставки предохранителя, расположенной возле этого электродвигателя для его защиты, может сгореть вставка предохранителя магистральной линии, и вся мастерская останется без напряжения. Чтобы этого не произошло, следует вставку предохранителей магистральной линии взять на одну ступень выше, т. е. на 80 *а*.

Плавкий предохранитель является хорошей защитой от коротких замыканий, так как при больших токах время его перегорания ничтожно мало. Но короткозамкнутый электродвигатель не будет защищен от перегрузки плавкой вставкой, которая выбирается по его пусковому току.

Для защиты электродвигателей от перегрузки применяются автоматы с тепловыми расцепителями или магнитные пускатели с тепловыми реле. Нагревательный элемент расцепителя или теплового реле не действует при толчках пускового тока, так как за короткое время протекания пускового тока этот элемент не успевает нагреться. Следовательно, *номинальный ток нагревательных элементов теплового расцепителя или теплового реле* $I_{н.тепл}$ *нужно выбирать по длительному расчетному току* $I_{дл}$, *не считаясь с толчками пусковых токов*

$$I_{н.тепл} \geqslant I_{дл} . \qquad (10)$$

Если нагрузка линии будет превышать номинальный ток нагревательного элемента на 20—30%, последний придет в действие и вызовет отключение линии. Наименьший ток, который приводит в действие расцепитель, называется *током срабатывания расцепителя.*

Для нагревательных элементов теплового расцепителя или теплового реле можно считать ток срабатывания равным 125% номинального тока.

Автоматы с тепловыми расцепителями и пускатели с тепловыми реле хорошо защищают электродвигатели от перегрузок, при которых увеличение тока против номинального сравнительно невелико. Но для защиты от коротких замыканий они не годятся, так как большой ток короткого замыкания успевает повредить электродвигатель, прежде чем произойдет отключение автомата от медленно действующего теплового расцепителя. Поэтому в дополнение к тепловой защите всегда следует устанавливать либо предохранители, либо автоматы с электромагнитными расцепителями. Последние рассчитаны на мгновенное отключение больших токов и наравне с предохранителями являются хорошей защитой от коротких замыканий.

Номинальный ток электромагнитного расцепителя $I_{н.эл.м}$ *выбирается по длительному расчетному току линии*

$$I_{н.эл.м} \geqslant I_{дл}, \qquad (11)$$

но при этом во избежание ложных отключений при пуске электродвигателя для электромагнитного расцепителя требуется дополнительная проверка по пусковому току. Ток срабатывания *электромагнитного расцепителя* $I_{ср.эл.м}$ *должен быть не меньше 125% максимального кратковременного тока линии*, определение которого дано в формуле (9).

$$I_{ср.эл.м} \geqslant 1{,}25 I_{макс.кр}. \qquad (12)$$

Существуют автоматы с комбинированными расцепителями, имеющими тепловой и электромагнитный элементы. Такие автоматы одновременно защищают электродвигатель или линию как от перегрузки, так и от коротких замыканий.

Следует упомянуть, что автоматы могут быть с расцепителями, допускающими регулировку тока срабатывания (например, автомат типа АП-25), и с расцепителями, не допускающими регулировки (например, автоматы серии А3100).

Пример 7. Выбрать автоматы для управления и защиты электродвигателей примера 6 и определить номинальные токи тепловых расцепителей автоматов.

Решение. Выбираем для защиты электродвигателей трехполюсный автомат типа АП-25-3Т в чугунном корпусе с тепловым расцепителем, рассчитанный при напряжении 380 *в* на пуск электродвигателей мощностью до 10 *квт*. Определяем номинальный ток теплового расцепителя для электродвигателя № 1 по формуле (10):

$$I_{н.тепл} \geqslant I_{дл.дв} = 18{,}5 \ а.$$

Останавливаемся на расцепителе с номинальным током 25 *а*. Так как расцепитель автомата АП-25 на номинальный ток 25 *а* допускает регулировку тока уставки [1] в пределах от 16 до 2,5 *а*, ток его уставки может быть отрегулирован по расчетному току электродвигателя на 18,5 *а*. На практике расцепитель обычно устанавливают по номинальному току электродвигателя, т. е. в нашем случае по току 21,5 *а*.

Расцепители для других электродвигателей выбираем подобным же образом, их номинальные токи указываем на рис. 4.

3. Выбор сечения проводов и кабелей по условию нагревания

Выбор сечения проводов и кабелей на нагревание, как указывалось, производится в зависимости от типа электроприемников, назначения электропроводки и условий ее эксплуатации. Правила устройства электроустановок, кратко обозначаемые в дальнейшем ПУЭ, разделяют все сети на две группы и устанавливают, на какие токи должны быть рассчитаны и как защищены сети каждой из этих групп.

К первой группе относятся следующие сети:

а) осветительные сети и сети бытовых и передвижных электроприемников в жилых и общественных зданиях, торговых и складских помещениях, служебно-бытовых поме-

[1] Уставкой расцепителя называется его настройка на определенное значение номинального тока или тока срабатывания.

щениях промышленных предприятий; сети в пожаро- и взрывоопасных помещениях;

б) сети промышленных предприятий, а также силовые сети жилых, административных и общественных зданий и торговых помещений в тех случаях, когда по условиям технологического процесса или режима работы сети возможны длительные перегрузки проводов и кабелей.

Все перечисленные сети должны быть защищены от токов перегрузки. Для этого они должны быть так рассчитаны, чтобы длительная допустимая нагрузка для проводов и кабелей составляла не менее 125% номинального тока защитного аппарата $I_{н.защ}$, при этом в тех случаях, когда условия прокладки отличаются от нормальных, необходимо учитывать значение поправочного коэффициента:

$$I_{н.доп} \geqslant \frac{1{,}25 I_{н.защ}}{k_{попр}}. \qquad (13)$$

Ко второй группе относятся все остальные сети.

Для сетей второй группы сечение проводов и кабелей выбирается по расчетному длительному току $I_{дл}$ по формуле

$$I_{н.доп} \geqslant \frac{I_{дл}}{k_{поп.р}}. \qquad (14)$$

Выбранные таким образом сечения проверяются по отношению к установленным на линии защитным аппаратам из условий, чтобы допустимая нагрузка на проводник была не менее:

а) одной трети номинального тока плавкой вставки $I_{н.вст}$ предохранителя:

$$I_{доп} \geqslant \frac{1}{3} I_{н.вст}; \qquad (15)$$

б) двух третей номинального тока теплового расцепителя $I_{н.тепл}$ автоматического выключателя, не имеющего регулировки тока срабатывания:

$$I_{доп} \geqslant \frac{2}{3} I_{н.тепл}; \qquad (16)$$

в) двух третей тока срабатывания теплового расцепителя $I_{ср.тепл}$ автоматического выключателя, имеющего регулировку тока срабатывания:

$$I_{доп} \geqslant \frac{2}{3} I_{ср.тепл}; \qquad (17)$$

г) двух девятых тока срабатывания электромагнитного расцепителя $I_{ср.эл.м}$ автоматического выключателя:

$$I_{доп} \geqslant \frac{2}{9} I_{ср.эл.м}. \quad (18)$$

Для сетей второй группы при наличии квалифицированного обслуживания и при хорошем состоянии электросетей и электрооборудования допускается выбор сечений проводов и кабелей по длительному расчетному току линии из соотношения (14) без последующей проверки по отношению к защитным аппаратам.

Во всех случаях сети и их защита должны быть так рассчитаны, чтобы защитный аппарат отключал одно- и многофазные короткие замыкания, образовавшиеся в конце защищаемого участка.

Для обеспечения этого условия иногда бывает необходимо дополнительно установить на линии промежуточный защитный аппарат или принять меры к уменьшению сопротивления линии.

Отключение короткого замыкания будет обеспечено, если будут выполнены следующие условия:

а) при защите линии предохранителями ток короткого замыкания $I_{к.з}$ должен быть не меньше трехкратной величины номинального тока плавкой вставки $I_{н.вст}$:

$$I_{к.з} \geqslant 3I_{н.вст}; \quad (19)$$

б) при защите автоматическим выключателем ток короткого замыкания должен быть не меньше полуторакратной величины тока срабатывания расцепителя автомата $I_{ср.авт}$:

$$I_{к.з} \geqslant 1{,}5 I_{ср.авт}. \quad (20)$$

Величина тока короткого замыкания определяется по формуле

$$I_{к.з} = \frac{U_н}{Z} = \frac{U_н}{z_1 l} \quad (21)$$

где $U_н$ — напряжение между проводами линии, *в*;

$Z = z_1 l$ — полное сопротивление петли прямого и обратного проводов линии, *ом*;

l — длина линии от защитного аппарата до конца защищаемого участка линии, *км*;

z_1 — полное сопротивление петли прямого и обратного проводов, на 1 *км* линии, *ом*.

Для трехпроводной сети расчет следует производить для двухфазного короткого замыкания, когда замыкаются между собой два фазных провода, при этом в формулу (21) подставляется междуфазное напряжение и z_1 берется для петли двух фазных проводов. Для четырехпроводной сети расчет следует производить для однофазного короткого замыкания, когда фазный провод замыкается с нулевым; при этом в формулу подставляется фазное напряжение, и z_1 берется для петли фазного и нулевого проводов.

Значения z_1 для кабельных и воздушных линий приведены в табл. 8. На практике величину $Z=z_1 l$ можно определить следующим образом. Петлю двух проводов закорачивают в конце линии, подводят к линии пониженное напряжение и измеряют вольтметром напряжение U между этими проводами в начале линии и амперметром ток линии $I_{к.з}$. Тогда $Z=\frac{U}{I_{к.з}}$.

При наличии нескольких участков линии с разными значениями z_1, z_2 и т. д. общее сопротивление линии определяется по приближенной формуле

$$Z=z_1 l_1+z_2 l_2+\dots \qquad (22)^*$$

Пример 8. Электропроводка примера 6 выполняется медным трехжильным проводом с резиновой изоляцией марки ПРТО в стальных трубах. Определить сечение проводов по условию нагревания, если длительной перегрузки в сети мастерской не ожидается, и расчетная температура воздуха составляет +25° С.

Решение. Механическая мастерская не является пожароопасным помещением и, следовательно, учитывая отсутствие вероятности длительных перегрузок, следует отнести сеть мастерской ко второй группе. Выбираем сечение всех участков сети по их расчетному длительному току из выражения (14), в котором следует положить $k_{попр}=1$, так как в примере условия прокладки являются нормальными:

$$I_{н.доп}\geqslant I_{дл}.$$

---

* Когда найденная из формул (21) и (22) величина тока короткого замыкания больше чем в 2—3 раза превышает номинальный ток источника питания (электростанции или трансформаторной подстанции), в расчете к сопротивлению линии необходимо добавить сопротивление обмоток генератора или трансформатора.

Для линии электродвигателя № 1 $I_{дл} = 18{,}5$ *а* (см. рис. 4). По табл. 3 выбираем сечение 2,5 *мм*², которое допускает при прокладке трехжильного провода в трубе нагрузку 19 *а*.

Для других участков сети сечение выбирается аналогично.

Выбранные по расчетному току сечения проводов согласно требованиям ПУЭ необходимо проверить по отношению к установленным защитным аппаратам.

Проверяем сечение проводов линии к электродвигателю № 1. От автомата до двигателя линия защищена тепловым расцепителем автомата на номинальный ток 25 *а*. Расцепитель автомата АП-25 допускает регулировку и устанавливается по номинальному току двигателя 21,5 *а* (см. пример 6). Ток срабатывания теплового расцепителя на 25% выше тока уставки: $I_{ср.тепл} = 1{,}25 \times 21{,}5 = 27$ *а*. Производим проверку сечения провода по условию (17):

$$I_{доп} \geqslant \frac{2}{3} I_{ср.тепл},$$

$$19 > \frac{2}{3} 27 = 18 \text{ а}.$$

Как видим, выбранное сечение провода удовлетворяет требованиям по отношению к аппарату защиты.

Делаем такую же проверку для всех остальных участков сети и убеждаемся, что выбранные по длительному току сечения не требуют увеличения из условий, установленных ПУЭ для соотношения между величиной допускаемой нагрузки на провод и номинальным током или током срабатывания защитного аппарата.

Ввиду небольшой длины всех участков сети и небольшой величины номинальных токов защитных аппаратов условие действия защиты при коротком замыкании выполняется с большим запасом.

Выбранные сечения указываем на плане мастерской и на расчетной схеме.

Пример 9. Определить, какое сечение провода следовало бы принять для магистральной линии примера 8, если помещение было бы пожароопасным?

Р е ш е н и е. В этом случае допустимая нагрузка на провод должна удовлетворять условию (13), где для нашего примера:

$$k_{попр} = 1 \text{ и } I_{н.защ} = 80 \text{ а},$$

$$I_{н.доп} \geqslant \frac{1{,}25 I_{н.защ}}{k_{попр}} = \frac{1{,}25 \cdot 80}{1{,}0} = 100 \text{ а}.$$

Из табл. 3 находим сечение провода 50 *мм*², для которого $I_{н.доп} = 120$ *а*, т. е. требуемое условие выполняется (120 *а* > 100 *а*).

Как видим, для обеспечения условий надежной защиты от перегрузки сетей первой группы требуется весьма значительное увеличение сечения проводов по сравнению с сетями второй группы.

Пример 10. Линия длиной 1 *км*, напряжением 500 *в* выполнена кабелем с медными жилами сечением 3×50 *мм*² и защищена автоматом с электромагнитным расцепителем, ток срабатывания которого $I_{ср.авт} = 350$ *а*. Проверить, будет ли обеспечено отключение линии автоматом при двухфазном коротком замыкании в конце линии?

Решение. Определяем величину тока короткого замыкания из (21):

$$I_{к.з} = \frac{U_н}{z_1 l}.$$

В нашем случае $U_н = 500$ *в* и $l = 1$ *км*. Из табл. 8 находим для медного кабеля $z_1 = 0{,}76$ *ом/км* при сечении прямого и обратного проводов (жил кабеля), равном 50 *мм²*.

Подставляя числовые значения, получаем:

$$I_{к.з} = \frac{500}{0{,}76 \cdot 1} = 660 \text{ } а.$$

Подставляя в (20) $I_{ср.авт} = 350$ *а*, убеждаемся, что отключение линии автоматом при коротком замыкании будет обеспечено:

$$I_{к.з} \geqslant 1{,}5 I_{ср.авт}; \qquad 660 \text{ } а > 1{,}5 \cdot 350 = 525 \text{ } а.$$

Для облегчения пользования формулами § 2 ниже приводится сводная таблица условных обозначений токов, входящих в расчетные формулы.

Условное обозначение	Пояснение к условному обозначению
$I_{н.дв}$	Номинальный ток электродвигателя
$I_{дл.дв}$	Расчетный длительный ток электродвигателя
$I_{пуск}$	Пусковой ток электродвигателя
$I_{дл}$	Расчетный длительный ток линии
$I_{макс.кр}$	Максимальный кратковременный ток линии
$I_{к.з}$	Ток короткого замыкания линии
$I_{н.доп}$	Допустимая нагрузка на провод или кабель при нормальных условиях
$I_{доп}$	Допустимая нагрузка на провод или кабель с учетом отклонения фактических условий от нормальных
$I_{н.защ}$	Номинальный ток защиты (плавкой вставки или расцепителя)
$I_{н.вст}$	Номинальный ток плавкой вставки
$I_{н.тепл}$	Номинальный ток теплового расцепителя
$I_{н.эл.м}$	Номинальный ток электромагнитного расцепителя
$I_{ср.авт}$	Ток срабатывания автомата
$I_{ср.тепл}$	Ток срабатывания теплового расцепителя
$I_{ср.эл.м}$	Ток срабатывания электромагнитного расцепителя

КАК ОПРЕДЕЛИТЬ СЕЧЕНИЕ ПРОВОДОВ ИЛИ КАБЕЛЕЙ ПО УСЛОВИЮ ДОПУСТИМОЙ ПОТЕРИ НАПРЯЖЕНИЯ

1. Почему электрическую сеть нужно рассчитывать на потерю напряжения

При снижении напряжения осветительная лампа дает меньше света, и тепловой прибор выделяет меньше тепла. Электродвигатель при этом сильнее греется и в нем возрастают потери энергии, так как величина протекающего по его обмоткам тока при снижении напряжения увеличивается. В равной степени нежелательно повышение напря-

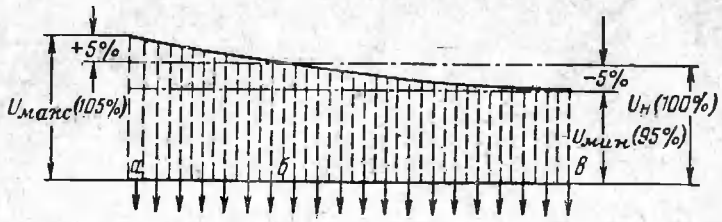

Рис. 5.

жения на зажимах приемника. Для осветительных ламп и бытовых приборов работа при повышенном напряжении вызывает сокращение срока их службы.

Напряжение, на которое рассчитаны приемник электроэнергии и при котором обеспечиваются наилучшие условия его работы, носит название номинального напряжения этого приемника.

Обеспечить для всех приемников, подключенных к электрической сети, работу при номинальном напряжении невозможно, так как в различных точках сети напряжения различны.

На рис. 5 дана схема линии наружного освещения, где стрелками представлены отдельные светильники. Напряжение в начале линии у источника питания в точке *а* будет наибольшим. При удалении от начала линии напряжение будет уменьшаться за счет потери напряжения в проводах линии. Наименьшее напряжение будет в конце линии в точке *в* на зажимах наиболее удаленного от источника питания светильника. Под номинальным напряжением будет находиться только одна лампа, подключенная в точке *б* линии. Все остальные лампы будут под напряжением либо

выше номинального (для ламп на участке *аб*) либо ниже номинального (для ламп на участке *бв*).

Разность между величиной фактического напряжения в какой-либо точке сети и величиной номинального напряжения носит название отклонения напряжения в этой точке.

На участке *аб* линии отклонение напряжения будет положительным, в точке *б* — равным нулю и на участке *бв* — отрицательным.

ПУЭ ограничивают величины наибольших отклонений напряжения у приемников электрической энергии следующими пределами:

а) лампы освещения жилых зданий, аварийного освещения и наружного освещения, выполненного светильниками ±5%;

б) лампы рабочего освещения промышленных предприятий и общественных зданий, а также прожекторных установок наружного освещения +5%; —2,5%;

в) электродвигатели ±5%; в отдельных случаях для электродвигателей допускается отклонение выше номинального до +10%.

Исходя из допустимых величин положительного и отрицательного отклонения напряжения, можно определить величину допустимой потери напряжения в сети.

Потерей напряжения ΔU между двумя точками сети называется разность напряжений этих двух точек.

Например, для линии рис. 5 потеря напряжения от начала до конца линии составит:

$$\Delta U_{ав} = U_а - U_в = U_{макс} - U_{мин}.$$

Принимая отклонения напряжения согласно ПУЭ ±5%, получим наибольшее допустимое напряжение в начале линии 105% номинального и наименьшее допустимое напряжение в конце линии 95%, откуда максимальная величина допустимой потери напряжения в линии

$$\Delta U_{ав} = 105 - 95 = 10\%.$$

Таким же образом можем определить величину наибольшей допустимой потери напряжения для сети рабочего освещения промышленных предприятий $\Delta U = 7{,}5\%$. Нужно отметить, что полученные величины потери напряжения могут быть приняты лишь в том случае, если у источника питания поддерживается напряжение на 5% выше номи-

нального. Предположим, что напряжение источника питания равно номинальному, т. е. 100%. Наименьшее напряжение в конце линии не должно быть ниже 95% и, следовательно, в этом случае располагаемая потеря напряжения будет равна только 100—95=5%.

Выбор сечения проводов и кабелей сети должен производиться по допускаемой потере напряжения, которая устанавливается с таким расчетом, чтобы отклонения напряжения для всех присоединенных к этой сети приемников не выходили за пределы допустимого.

2. Основные понятия о расчете сети на потерю напряжения

Рассмотрим трехфазную линию переменного тока длиной l [*км*] с нагрузкой I [*а*], сосредоточенной в конце линии (рис. 6).

Для такой линии потеря напряжения в вольтах (ΔU) определяется в общем случае по формуле

$$\Delta U = 1{,}73(r\cos\varphi + x\sin\varphi)Il,$$

где r — активное сопротивление 1 *км* линии, *ом*;

x — индуктивное (реактивное) сопротивление 1 *км* линии, *ом*;

$\cos\varphi$ — коэффициент мощности нагрузки;

$\sin\varphi$ определяется по тригонометрическим таблицам по заданному значению $\cos\varphi$.

Рассматривая выражение для определения потери напряжения, можем сделать следующие заключения.

Потеря напряжения ΔU пропорциональна нагрузке линии I и ее длине l.

Потеря напряжения пропорциональна выражению ($r\cos\varphi + x\sin\varphi$). Это выражение является суммой двух слагаемых $r\cos\varphi$ и $x\sin\varphi$. Первое из них зависит от активного сопротивления линии r, второе — от ее индуктивного сопротивления x. Кроме того, на величину этих слагаемых существенное влияние оказывает величина коэффициента мощности нагрузки.

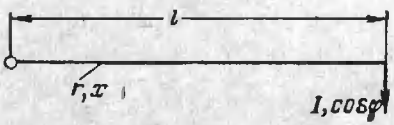

Рис. 6.

Активное сопротивление линии r зависит от сечения и материала провода.

Индуктивное сопротивление линии x зависит от магнитного потока, пронизывающего пространство между проводами линии. Чем больше расстояние между проводами,

тем больше индуктивное сопротивление линии. Для кабелей расстояние между жилами мало, и индуктивное сопротивление имеет порядок 0,06—0,08 *ом/км*. Такой же порядок имеет индуктивное сопротивление проводов при прокладке их в трубах. Для проводов, проложенных внутри зданий на роликах и изоляторах с расстоянием 50—150 *мм*, индуктивное сопротивление увеличивается и составляет 0,2—0,25 *ом/км*. Для воздушных линий индуктивное сопротивление возрастает до 0,3—0,4 *ом/км*.

Следует отметить, что для сети постоянного тока индуктивное сопротивление равно нулю.

При расчете сети на потерю напряжения активное сопротивление проводов всегда должно учитываться. Что же касается индуктивного сопротивления, то в ряде случаев расчета им можно пренебречь. Величина ошибки при этом зависит от соотношения между величинами $r\cos\varphi$ и $x\sin\varphi$.

Для осветительной нагрузки и нагрузки от тепловых приборов коэффициент мощности $\cos\varphi=1$, т. е. $\sin\varphi=0$. В этом случае индуктивностью проводов всегда можно пренебречь вне зависимости от величины самого индуктивного сопротивления линии. Для нагрузки с коэффициентом мощности, меньшим 1, значение $\sin\varphi$ становится отличным от нуля. Чем меньше значение $\cos\varphi$, тем больше величина $\sin\varphi$, поэтому с ухудшением коэффициента мощности влияние индуктивного сопротивления линии на величину потери напряжения увеличивается.

Чем больше сечение проводов, тем меньше становится величина $r\cos\varphi$, в то время как величина $x\sin\varphi$ с увеличением сечения проводов убывает лишь незначительно. Следовательно, с увеличением сечения проводов относительное влияние индуктивного сопротивления на потерю напряжения возрастает.

Наконец, очевидно, что влияние индуктивного сопротивления проводов на потерю напряжения будет увеличиваться при переходе от кабельной сети к внутренней сети, выполненной проводами на роликах и изоляторах, и от последней к воздушной сети, так как при этом будет возрастать величина самого индуктивного сопротивления.

При расчете на потерю напряжения сети, выполненной медными или алюминиевыми проводами и кабелями, следует руководствоваться следующим:

1. *Без учета индуктивного сопротивления проводов рассчитываются:*

а) сети постоянного тока;

б) участки сети переменного тока, для которых можно принять $\cos\varphi=1$;

в) сети, выполненные проводами и кабелями сечением до 6 *мм*^{2} включительно;

г) сети, выполненные проводами внутри зданий или кабелями, если их сечения не превосходят сечений, указанных в следующей ниже таблице.

Коэффициент мощности	0,9		0,8		0,7	
Материал проводов	Медь	Алюминий	Медь	Алюминий	Медь	Алюминий
Кабели и провода, проложенные в трубах	70	120	35	70	25	50
Провода, проложенные на роликах или изоляторах . .	16	25	10	16	6	10

2. *Все остальные сети должны рассчитываться с учетом индуктивного сопротивления.*

3. Как определить сечение проводов и кабелей по допустимой потере напряжения без учета индуктивного сопротивления линии

При заданном сечении проводов линии потеря напряжения в вольтах определяется по формулам:

Трехфазная линия переменного тока:

$$\Delta U = \frac{1\,000}{\gamma U_н} \cdot \frac{P_1 l_1 + P_2 l_2 + \dots}{s}; \qquad (23)$$

$$\Delta U = \frac{1{,}73}{\gamma} \cdot \frac{I_{a1} l_1 + I_{a2} l_2 + \dots}{s}. \qquad (24)$$

Двухпроводная линия переменного или постоянного тока

$$\Delta U = \frac{2\,000}{\gamma U_н} \cdot \frac{P_1 l_1 + P_2 l_2 + \dots}{s}; \qquad (25)$$

$$\Delta U = \frac{2}{\gamma} \cdot \frac{I_{a1} l_1 + I_{a2} l_2 + \dots}{s}, \qquad (26)$$

где γ — удельная проводимость материала проводов, *м/ом·мм²*, для медных проводов и кабелей $\gamma = 53$ *м/ом·мм²* и для алюминиевых $\gamma = 31{,}7$ *м/ом·мм²*;

$U_н$ — номинальное напряжение сети, *в* (для трехфазной линии $U_н$ — междуфазное напряжение);

s — сечение проводов, *мм²*;

$P_1 l_1 + P_2 l_2 + \ldots$ — сумма произведений нагрузок, протекающих по участкам линии, на длины этих участков; нагрузки здесь должны быть выражены в киловаттах, длины в метрах;

$I_{a1} l_1 + I_{a2} l_2 + \ldots$ — сумма произведений, протекающих по участкам активных составляющих токов, *а*, на длины участков, *м*; активные составляющие тока определяются умножением тока на коэффициент мощности $I_a = I \cos \varphi$.

При расчете линии постоянного тока следует считать: $I_a = I$.

Сумма произведений нагрузок на длины участков должна быть подсчитана на протяжении всей линии, для которой определяется величина потери напряжения. Как опре-

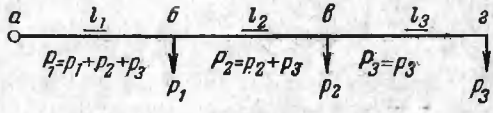

Рис. 7.

деляется эта сумма, покажем на примере линии с тремя нагрузками, схема которой представлена на рис. 7.

Находим нагрузки, протекающие по участкам линии.

Нагрузка участка *вг*, очевидно, равна нагрузке потребителя в точке *г*: $P_3 = p_3$. На участке *бв* нагрузка складывается из нагрузок, присоединенных в точках *в* и *г*: $P_2 = p_2 + p_3$. Наконец, на участке *аб* нагрузка равна сумме нагрузок всех присоединенных к линии потребителей: $P_1 = p_1 + p_2 + p_3$. При подсчете потери напряжения на участке *аб* линии следует в формулу (23) или (25) подставить произведение нагрузки на длину этого участка: $P_1 l_1$. Если же требуется найти потерю напряжения для всей линии, следует в формулу подставить сумму произведений

нагрузок на длины участков для всей линии: $P_1l_1+P_2l_2+$ $+P_3l_3$. Отметим, что *при расчете сети на потерю напряжения равномерно распределенная нагрузка на каком-либо участке линии может быть заменена равной по мощности нагрузкой, сосредоточенной в середине этого участка,* благодаря чему расчет значительно упрощается.

При заданной величине потери напряжения сечение линии определяется из формул:

Трехфазная линия переменного тока

$$s=\frac{1\,000}{\gamma U_н}\cdot\frac{P_1l_1+P_2l_2+\ldots}{\Delta U}, \tag{27}$$

$$s=\frac{1{,}73}{\gamma}\cdot\frac{I_{a1}l_1+I_{a2}l_2+\ldots}{\Delta U}; \tag{28}$$

Двухпроводная линия переменного или постоянного тока

$$s=\frac{2\,000}{\gamma U_н}\cdot\frac{P_1l_1+P_2l_2+\ldots}{\Delta U}, \tag{29}$$

$$s=\frac{2}{\gamma}\cdot\frac{I_{a1}l_1+I_{a2}l_2+\ldots}{\Delta U}, \tag{30}$$

где ΔU — допустимая потеря напряжения в линии, сечение которой определяется, *в*.

Для пересчета допустимой потери напряжения, заданной в процентах номинального напряжения ($\Delta U_{\%}$), в потерю напряжения, выраженную в вольтах (ΔU) и обратно, служат формулы:

$$\Delta U=\frac{\Delta U_{\%}U_н}{100}; \tag{31}$$

$$\Delta U_{\%}=\frac{\Delta U 100}{U_н}. \tag{32}$$

Пример 11. Определить потерю напряжения от шин распределительного щита до зажимов электродвигателя № 1 в сети мастерской примера 6 (см. рис. 4).

Решение. Потерю напряжения для сети примера 6 можно определить без учета индуктивного сопротивления проводов, так как при прокладке медных проводов в трубах при $\cos\varphi=0{,}8$ индуктивностью можно пренебречь для сечений до 35 *мм*², в нашем же случае наибольшее сечение равно 10 *мм*², при среднем коэффициенте мощности $\cos\varphi_{ср}=0{,}82$ (см. таблицу примера 6).

Для магистрального участка

$$I_{a1} = I_1 \cos \varphi_{cp} = 34{,}4 \cdot 0{,}82 = 28{,}2 \ a; \ s_1 = 10 \ мм^2; \ l_1 = 9 \ м.$$

Для линии, питающей электродвигатель № 1:

$$I_{a2} = 18{,}5 \cdot 0{,}82 = 15{,}2 \ a; \ s_2 = 2{,}5 \ мм^2; \ l_2 = 12 \ м.$$

Для медных проводов удельная проводимость $\gamma = 53 \ м/ом \cdot мм^2$.

Подставляя числовые значения в формулу (24), получаем потерю напряжения в магистральной линии:

$$\Delta U_1 = \frac{1{,}73}{\gamma} \cdot \frac{I_{a1} l_1}{s_1} = \frac{1{,}73}{53} \cdot \frac{28{,}2 \cdot 9}{10} = 0{,}83 \ в$$

и потерю напряжения в линии, питающей электродвигатель № 1:

$$\Delta U_2 = \frac{1{,}73}{\gamma} \cdot \frac{I_{a2} l_2}{s_2} = \frac{1{,}73}{53} \cdot \frac{15{,}2 \cdot 12}{2{,}5} = 2{,}38 \ в.$$

Общая потеря напряжения до зажимов электродвигателя № 1 $\Delta U = 0{,}83 + 2{,}38 = 3{,}21 \ в$ или в процентах к номинальному напряжению из (32):

$$\Delta U_{\%} = \frac{\Delta U 100}{U_н} = \frac{3{,}21 \cdot 100}{380} = 0{,}845\%,$$

что вполне допустимо.

Пример 12. Определить сечение двухпроводной линии уличного освещения из примера 1 общей длиной 800 *м*, к которой присоединено 20 светильников с лампами по 200 *вт* через каждые 40 *м*. Напряжение линии $U_н = 220 \ в$, допускаемая потеря напряжения $\Delta U_{\%} = 6\%$, материал проводов — алюминий.

Решение. В нашем примере нагрузка равномерно распределена вдоль линии.

Общая мощность 20 светильников равна $20 \cdot 0{,}2 = 4 \ квт$. Заменив равномерно распределенную нагрузку линии сосредоточенной в ее середине, получим расчетную схему, изображенную на рис. 8. Определяем величину допустимой потери напряжения в вольтах из (31):

$$\Delta U = \frac{\Delta U_{\%} U_н}{100} = \frac{6 \cdot 220}{100} = 13{,}2 \ в.$$

Сечение проводов определяем из формулы (29), подставляя в нее $\gamma = 31{,}7 \ м/ом \cdot мм^2$ (для алюминия), $P = 4 \ квт$, $l = 400 \ м$, $\Delta U = 13{,}2 \ в$.

$$s = \frac{2\,000}{\gamma U_н} \cdot \frac{Pl}{\Delta U} = \frac{2\,000}{31{,}7 \cdot 220} \cdot \frac{4 \cdot 400}{13{,}2} = 34{,}7 \ мм^2.$$

Принимаем для проводов линии ближайшее большее стандартное сечение 35 $мм^2$. Проверяем принятое сечение провода на нагревание. Ток в начале линии равен 18,2 *а* (см. пример 1). Для защиты линии

устанавливаем предохранитель с плавкой вставкой на 20 *а*. Из табл. 2 находим допустимую нагрузку для алюминиевого провода марки А35 при прокладке на открытом воздухе: $I_{н.доп}=170$ *а*. Как видим, сечение провода, выбранное по условию допустимой потери напряжения, условию нагревания удовлетворяет с большим запасом.

Воздушные сети поселков и колхозов в большинстве случаев должны рассчитываться на потерю напряжения. Этот расчет для таких сетей является решающим при выборе сечений проводов. Расчет на нагревание носит здесь лишь поверочный характер. Напротив, для сети с короткими линиями, нагруженными большими токами, решающим является выбор сечения проводников по условию нагревания. Таковы в большинстве случаев силовые сети промышленных предприятий. Здесь выбор сечений производится из условий нагревания, и подсчет потери напряжения имеет только поверочный характер.

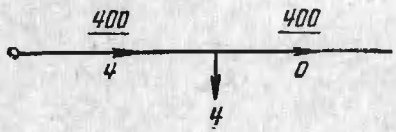

Рис. 8.

Во всех случаях необходима проверка на условие отключения защитными аппаратами коротких замыканий в наиболее удаленных точках сети.

Пример 13. Рассчитать на потерю напряжения двухпроводную линию внутреннего освещения промышленного предприятия. Расчетная схема линии дана на рис. 9, на котором мощность ламп указана в киловаттах, длины участков — в метрах. Номинальное напряжение линии: $U_н=220$ *в*, допустимая потеря напряжения $\Delta U_{\%}=2{,}5\%$, провода алюминиевые марки АПР проложены на изоляторах с расстояниями между изоляторами до 2 *м*.

Р е ш е н и е. Для определения сечения проводов в нашем случае

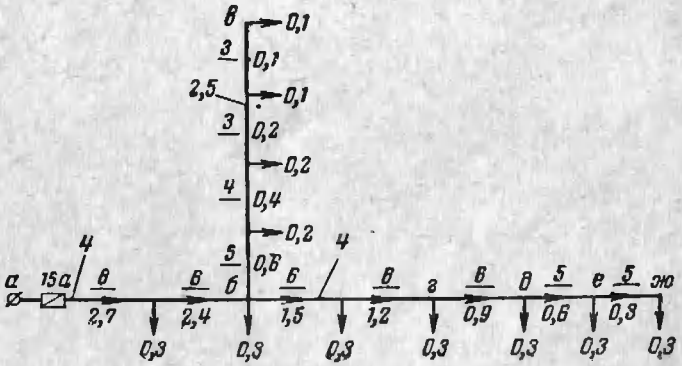

Рис. 9.

следует воспользоваться формулой (29), так как для ламп накаливания $\cos\varphi = 1$, линия двухпроводная, и нагрузки выражены в *квт*.

$$s = \frac{2\,000}{\gamma U_н} \cdot \frac{P_1 l_1 + P_2 l_2 + \ldots}{\Delta U}.$$

В нашем случае $U_н = 220$ *в* и $\gamma = 31{,}7$ *м/ом·мм²*.

Определяем числовое значение первого множителя приведенной формулы:

$$\frac{2\,000}{\gamma U_н} = \frac{2\,000}{31{,}7 \cdot 220} = 0{,}286.$$

Допустимая потеря напряжения в линии $\Delta U = \frac{2{,}5 \cdot 220}{100} = 5{,}5$ *в*. Находим распределение нагрузок в линии. На участке *еж* нагрузка, очевидно, равна 0,3 *квт* мощности одной лампы, на участке *де* — 0,6 *квт* двух ламп. Подобным же образом последовательно находим нагрузки всех участков линии и указываем их на схеме. Определяем сумму: $P_1 l_1 + P_2 l_2 + \ldots$ от начала линии до той лампы, для которой эта сумма будет наибольшая. В нашем примере это лампа, присоединенная в точке *ж*. Следовательно: $P_1 l_1 + P_2 l_2 + \ldots = 2{,}7 \cdot 6 + 2{,}4 \cdot 6 + 1{,}5 \times 6 + 1{,}2 \cdot 6 + 0{,}9 \cdot 6 + 0{,}6 \cdot 5 + 0{,}3 \cdot 5 = 56{,}7$ *квт·м*.

Подставляя числовые значения в формулу (29), определяем сечение основной магистрали, *абж*:

$$s_{абж} = \frac{2\,000}{\gamma U_н} \cdot \frac{P_1 l_1 + P_2 l_2 + \ldots}{\Delta U} = 0{,}286 \frac{56{,}7}{5{,}5} = 2{,}95 \text{ мм}^2.$$

Округляя до ближайщего стандартного сечения, принимаем сечение магистрали *абж* равным 4 *мм²*. Для определения сечения ответвления *бв* найдем потерю напряжения на участке *аб* магистрали:

$$\Delta U_{аб} = 0{,}286 \frac{P_1 l_1 + P_2 l_2}{s_{аб}}.$$

В нашем случае $P_1 l_1 + P_2 l_2 = 2{,}7 \cdot 6 + 2{,}4 \cdot 6 = 30{,}6$ *квт·м* и $s_{аб} = 4$ *мм²*, откуда

$$\Delta U_{аб} = 0{,}286 \frac{30{,}6}{4} = 2{,}2 \text{ в}.$$

Общая допустимая потеря напряжения равна 5,5 *в*, на участке *аб* магистрали потеря напряжения составляет 2,2 *в*, следовательно, при расчете ответвления *бв* можно допустить потерю напряжения, равную

$$\Delta U = 5{,}5 - 2{,}2 = 3{,}3 \text{ в}.$$

Для ответвления *бв*

$$P_1 l_1 + P_2 l_2 + \ldots = 0{,}6 \cdot 5 + 0{,}4 \cdot 4 + 0{,}2 \cdot 3 + 0{,}1 \cdot 3 = 5{,}5 \text{ квт·м}.$$

Определяем сечение ответвления *б в*

$$s_{бв} = 0{,}286 \frac{5{,}5}{3{,}3} = 0{,}475 \text{ мм}^2.$$

Из табл. 1 находим для изолированных проводов с расстоянием между точками крепления (изоляторами) до 2 *м* минимальное сечение 2,5 *мм*², которое и принимаем по условию механической прочности для ответвления *бв*. Принятые сечения проводов с запасом удовлетворяют условиям расчета на нагревание.

Для облегчения расчетов сети на потерю напряжения без учета индуктивности проводов в табл. 10 приведены для различных случаев значения потери напряжения в процентах на 1 *квт·км* при номинальном напряжении сети 110—500 *в* и на 1 *квт·м* на напряжение сети 12—36 *в*.

4. Как определить сечение проводов и кабелей по допустимой потере напряжения с учетом индуктивного сопротивления линии

Расчет сечения проводов по заданной потере напряжения с учетом индуктивности линии не может быть сделан непосредственно по формуле, так как зависимость индуктивного сопротивления линии от сечения провода носит сложный характер.

Для расчета трехпроводных сетей напряжением 380 *в* или четырехпроводных 380/220 *в* в табл. 9 даны для различных условий величины потери напряжения в процентах на 1 *квт·км*. При расчете сетей напряжением 220 *в* или 220/127 *в* можно пользоваться данными этой же таблицы, увеличивая их в 3 раза.

С помощью табл. 9 и 10 потеря напряжения в процентах в линии заданного сечения при заданных условиях прокладки определяется из выражения

$$\Delta U_{\%} = \Delta U_{1\%}(P_1 l_1 + P_2 l_2 + \dots), \qquad (33)$$

где $\Delta U_{1\%}$ — потеря напряжения на 1 *квт·км* или 1 *квт·м*, найденная в табл. 9 или 10;

$P_1 l_1 + P_2 l_2 + \dots$ — сумма произведений нагрузок на длины участков для данной линии.

При определении сечения по заданной потере напряжения подыскивают в таблице такое сечение, для которого $\Delta U_{1\%}$ удовлетворяло бы соотношению

$$\Delta U_{1\%} \leqslant \frac{\Delta U\%}{P_1 l_1 + P_2 l_2 + \dots}. \qquad (34)$$

В заключение нужно сказать о выборе сечения нулевого провода в четырехпроводных сетях трехфазного пере-

менного тока 380/220 *в* и 220/127 *в*. В таких сетях на практике никогда не удается достичь полной равномерности нагрузки фаз. По нулевому проводу всегда протекает ток неравномерности, учитывая который *сечение нулевого провода четырехпроводной линии принимают от* $^1/_3$ *до* $^1/_2$ *сечения фазного провода.*

Пример 14. Воздушная линия трехфазного переменного тока напряжением 380/220 *в*, выполненная алюминиевыми проводами, питает ряд производственных строений совхоза с нагрузкой в виде небольших электродвигателей: слесарно-механическую мастерскую, лесопилку и др.

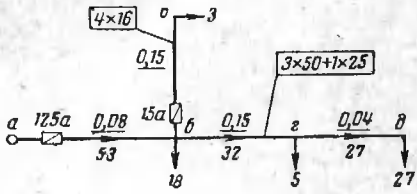

Рис. 10.

Расчетная схема линии представлена на рис. 10, где нагрузки указаны в киловаттах и длины в километрах. Средний коэффициент мощности может быть принят равным $\cos\varphi_{ср}=0{,}8$. Определить сечение проводов линии, если допустимая потеря напряжения $\Delta U_{\%}=7\%$.

Решение. Находим распределение нагрузок по участкам линии и указываем их на схеме. Определяем наибольшую величину суммы: $P_1l_1+P_2l_2+\ldots$ для линии:

$$P_1l_1+P_2l_2+\ldots=53\cdot0{,}08+32\cdot0{,}15+27\cdot0{,}04=10{,}1\ \textit{квт}\cdot\textit{км}.$$

Из формулы (34) находим:

$$\Delta U_{1\%}=\frac{\Delta U_{\%}}{P_1l_1+P_2l_2+\ldots}=\frac{7}{10{,}1}=0{,}693\%.$$

Из табл. 9 для воздушных линий, выполненных алюминиевыми проводами при $\cos\varphi=0{,}8$, подбираем сечением 50 *мм*², для которого $\Delta U_{1\%}=0{,}604\%<0{,}693\%$.

Принимаем сечение фазных проводов основной магистрали *абгд* равным 50 *мм*² и сечение нулевого провода на этом участке равным $^1/_2$ сечения фазного провода: $\frac{50}{2}=25$ *мм*².

Определяем из (33) потерю напряжения на участке *аб* магистрали:

$$\Delta U_{\%аб}=\Delta U_{1\%}P_1l_1=0{,}604\cdot53\cdot0{,}08=2{,}56\%.$$

Общая допустимая потеря напряжения $\Delta U_{\%}=7\%$, следовательно, при расчете ответвления *бв* можно допустить потерю напряжения, равную

$$\Delta U_{\%}=7-2{,}56=4{,}44\%.$$

Для выбора сечения ответвления *бв* определяем расчетную величину $\Delta U_{1\%}$:

$$\Delta U_{1\%} \leqslant \frac{4{,}44}{3 \cdot 0{,}15} = 9{,}9\%.$$

Как видим из табл. 9, для сечения 16 *мм*² $\Delta U_{1\%} = 1{,}54\%$ много меньше расчетного. Но взять для алюминиевых проводов воздушной линии меньшее сечение нельзя по условию механической прочности (см. табл. 1). Принимаем для ответвления *бв* сечение как фазных, так и нулевого проводов равным 16 *мм*². Выбранные сечения проводов указываем на схеме.

В начале линии устанавливаем предохранители с плавкой вставкой на 125 *а*. Для защиты ответвления *бв* на столбе установлены предохранители на 15 *а*. Проверка показывает, что выбранные по условию допускаемой потери напряжения сечения проводов с запасом удовлетворяют условиям расчета на нагревание.

Проверяем принятые плавкие вставки на ток 125 *а* по условию отключения короткого замыкания в наиболее удаленной точке *д*. Для нашего примера четырехпроводной сети 380/220 *в* расчет следует вести для случая однофазного короткого замыкания. Из табл. 8 находим для воздушной линии с сечением прямого (фазного) алюминиевого провода 50 *мм*² и с сечением обратного (нулевого) провода 25 *мм*²:

$$z_1 = 2{,}05 \ \text{ом/км},$$

откуда полное сопротивление линии

$$Z = z_1 l = 2{,}05(0{,}08 + 0{,}15 + 0{,}04) = 0{,}553 \ \text{ом}.$$

Фазное напряжение

$$U_н = 220 \ \text{в}.$$

Находим величину тока однофазного короткого замыкания из (21):

$$I_{к.з} = \frac{U_н}{Z} = \frac{220}{0{,}553} = 400 \ \text{а}.$$

Подставляя в (19) $I_{н.вст} = 125$ *а*, убеждаемся, что при коротком замыкании в конце линии перегорание плавкой вставки будет обеспечено:

$$I_{к.з} \geqslant 3 \ I_{н.вст}, \text{ или } 400 > 3 \cdot 125 = 375 \ \text{а}.$$

Подобным же образом убеждаемся, что при коротком замыкании в точке *в* будет обеспечено перегорание установленных на столбе предохранителей на 15 *а*.

Пример 15. На рис. 11 дан план части колхоза, на котором нанесены линии сети 380/220 *в*, питающие осветительную и бытовые нагрузки домов колхозников и общественных зданий и силовые нагрузки крытого тока и водокачки. Материал проводов — алюминий. Нагрузки указаны на плане в киловаттах. Электроснабжение колхоза предусмотрено от мачтового трансформаторного киоска мощностью 100 *ква*, питающегося по линии высокого напряжения 6 *кв*. На рис. 12 представ-

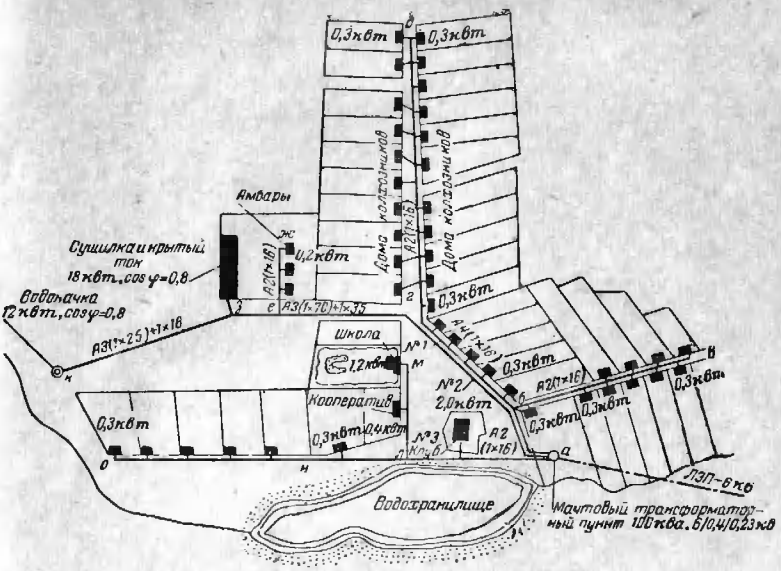
0,3квт
0,3квт
Дома колхозников
Дома колхозников
Амбары
Сушилка и крытый ток
18квт, cos φ=0,8
Водокачка
2квт, cos φ=0,8
0,2квт
0,3квт
Школа
1,2квт
№1
№2
2,0квт
Кооператив
0,3квт
0,4квт
№3
0,3квт
0,3квт
0,3квт
0,3квт
0,3квт
ЛЭП-6кв
Водохранилище
Мачтовый трансформаторный пункт 100ква. 6/0,4/0,23кв

Рис. 11.

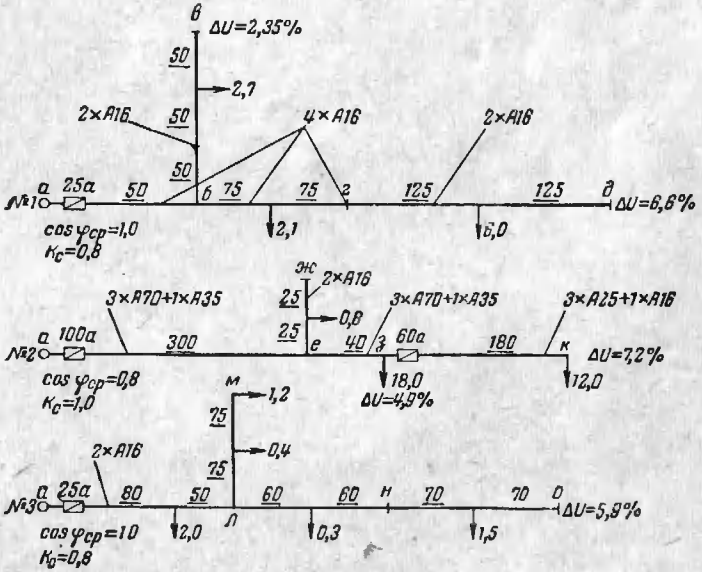
ΔU=2,35%
2,7
2×A16
4×A16
2×A16
ΔU=6,8%
2,1
6,0
cos φср=1,0
Кс=0,8
2×A16
3×A70+1×A35
3×A70+1×A35
3×A25+1×A16
ΔU=7,2%
0,8
18,0
12,0
ΔU=4,9%
cos φср=0,8
Кс=1,0
1,2
0,4
2×A16
ΔU=5,9%
2,0
0,3
1,5
cos φср=1,0
Кс=0,8

Рис. 12.

лены расчетные схемы трех линий колхоза с указанием нагрузок в киловаттах и длин участков в метрах. Равномерно распределенная нагрузка домов колхозников на отдельных участках линий заменена сосредоточенной в середине этих участков. На расчетных схемах показаны результаты расчета сети: принятые сечения участков сети, потеря напряжения в ее наиболее удаленных точках, места расположения и номинальные токи плавких вставок. При расчете было принято: для линий № 1 и 3 — средний коэффициент мощности $\cos \varphi_{cp}=1$ и коэффициент спроса для всей линии $k_c=0{,}8$ и для линии № 2 соответственно $\cos \varphi_{cp}=0{,}8$ и $k_c=1$. Предохранители 60 *а* на линии к водокачке установлены с тем, чтобы обеспечить отключение короткого замыкания в конце линии.

С целью экономии цветного металла слабо нагруженные ответвления линии № 1, обслуживающей бытовую нагрузку и освещение, взяты двухпроводными (однофазными). Из этих же соображений линия № 3 целиком выполнена однофазной.

Читателю предлагается самостоятельно произвести проверку правильности выбора сечений проводов электрической сети колхоза. Напомним, что при расчете линий № 1 и 3 на потерю напряжения следует подсчитанные по расчетной схеме суммы $P_1l_1+P_2l_2+\ldots$ умножать на коэффициент спроса линии $k_c=0{,}8$.

Таблица 1

Наименьшие допустимые сечения проводов по условию механической прочности

Характеристика провода и условий прокладки	Наименьшее сечение жилы, *мм*²	
	медной	алюминиевой
1. Изолированные провода внутри и снаружи осветительных арматур:		
внутри здания	0,5	—
вне зданий	1	—
2. Шнуры и провода в легком защитном резиновом, полихлорвиниловом шланге для подвесных и настольных ламп и для переносных бытовых токоприемников	0,75	—
3. То же в среднем защитном шланге для присоединения подвижных токоприемников в промышленных установках	1	—
4. То же, но в тяжелом шланге	2,5	—
5. Скрученные двухжильные провода для прокладки на изолирующих опорах, расположенных друг от друга на расстоянии до 1 *м*	1	—
6. Изолированные провода для прокладки на изолированных опорах, расположенных друг от друга на расстоянии:		
до 1 *м*	1	2,5
до 2 *м*	1,5	2,5
до 6 *м*	2,5	4
до 12 *м*	4	6
свыше 12 *м*	6	16
7. Изолированные провода для прокладки в трубах	1	2,5
8. Голые провода в зданиях	2,5	4
9. Голые защищенные от коррозии провода в зданиях	1,5	2,5
10. Изолированные и защищенные от коррозии голые провода в наружных проводках:		
по стенам	2,5	4
во всех других случаях	4	10
11. Голые провода в наружных проводках	4	10
12. Голые провода воздушных линий	6	16

Таблица 2

Допустимые длительные токовые нагрузки в амперах на голые провода с максимальной допустимой температурой провода +70° С при температуре воздуха +25 °С

Медные			Алюминиевые		
Марка провода	Токовая нагрузка, *а*		Марка провода	Токовая нагрузка, *а*	
	на открытом воздухе	внутри помещений		на открытом воздухе	внутри помещений
М-4	50	25	А-10	75	55
М-6	70	35	А-16	105	80
М-10	95	60	А-25	135	110
М-16	130	100	А-35	170	135
М-25	180	140	А-50	215	170
М-35	220	175	А-70	265	215
М-50	270	220	А-95	325	260
М-70	340	280	А-120	375	310
М-95	415	340	А-150	440	370
М-120	485	405	А-185	500	425
М-150	570	480	А-240	610	—

Таблица 3

Допустимые длительные токовые нагрузки в амперах для проводов с резиновой или полихлорвиниловой изоляцией и шнуров с резиновой изоляцией, с медными жилами, с максимально допустимой температурой жил +55° С при окружающей температуре воздуха +25° С

Сечение токопроводящей жилы, *мм²*	Допустимые токовые нагрузки, *а*					
	Провода, проложенные открыто	Провода, проложенные в одной трубе				
		Два одножильных	Три одножильных	Четыре одножильных	Один двухжильный	Один трехжильный
0,5	10	—	—	—	—	—
0,75	13	—	—	—	—	—
1	15	14	13	12	13	12
1,5	20	17	15	14	16	13
2,5	27	24	22	22	22	19
4	36	34	31	27	28	24
6	46	41	37	35	35	30
10	70	60	55	45	50	45
16	90	75	70	65	70	60
25	125	100	90	80	90	75
35	150	120	110	100	110	90
50	190	165	150	135	140	120
70	240	200	185	165	175	155
95	290	245	225	200	215	190
120	340	280	255	230	260	220
150	390	320	290	—	—	—

Таблица 4

Допустимые длительные токовые нагрузки в амперах для проводов с резиновой или полихлорвиниловой изоляцией с алюминиевыми жилами с максимальной допустимой температурой жил +55° С при окружающей температуре воздуха +25° С

Сечение токопроводящей жилы, *мм*²	Допустимые токовые нагрузки, *а*			
	Провода, проложенные открыто	Провода, проложенные в одной трубе		
		Два одножильных	Три одножильных	Четыре одножильных
2,5	21	18	17	17
4	28	25	25	20
6	35	32	28	27
10	50	45	42	35
16	70	55	55	50
25	95	75	70	60
35	115	90	85	75
50	145	125	115	105
70	185	155	145	125
95	225	190	175	155
120	260	215	195	175
150	300	245	225	—
185	345	—	—	—
240	410	—	—	—

Таблица 5

Допустимые длительные токовые нагрузки в амперах для кабелей с бумажной пропитанной изоляцией в свинцовой или алюминиевой оболочке с максимальной допустимой температурой жилы 80° С

Сечение токопроводящей жилы, *мм*²	Прокладка кабелей							
	в земле при +15° С				в воздухе при +25° С			
	Материал жил кабелей							
	Медь		Алюминий		Медь		Алюминий	
	Число жил кабелей							
	3	4	3	4	3	4	3	4
1,5	30	—	—	—	18	—	—	—
2,5	40	—	31	—	28	—	22	—
4	55	50	42	—	37	35	29	—
6	70	60	55	46	45	45	35	35
10	95	85	75	65	60	60	46	45
16	120	115	90	90	80	80	60	60
25	160	150	125	115	105	100	80	75
35	190	175	145	135	125	120	95	95
50	235	215	180	165	155	145	120	110
70	285	265	220	200	200	185	155	140
95	340	310	260	240	245	215	190	165
120	390	350	300	—	285	260	220	—
150	435	395	335	—	330	300	255	—
185	490	450	380	—	375	340	290	—
240	570	—	440	—	430	—	330	—

Таблица 6

Поправочные коэффициенты $k_{попр}$ для допустимых токовых нагрузок кабелей, голых и изолированных проводов, если температура земли или воздуха отличается от номинальной

Нормированная температура жил, °С	Расчетная температура среды, °С	Поправочные коэффициенты $k_{попр}$ при фактической температуре среды, °С											
		−5	0	+5	+10	+15	+20	+25	+30	+35	+40	+45	+50
80	15	1,14	1,11	1,08	1,04	1,00	0,96	0,92	0,88	0,83	0,78	0,73	0,68
	25	1,24	1,20	1,17	1,13	1,09	1,04	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,74
70	25	1,29	1,24	1,20	1,15	1,11	1,05	1,00	0,94	0,88	0,81	0,74	0,67
65	15	1,18	1,14	1,10	1,05	1,00	0,95	0,89	0,84	0,77	0,71	0,63	0,55
	25	1,32	1,27	1,22	1,17	1,12	1,06	1,00	0,94	0,87	0,79	0,71	0,61
55	15	1,22	1,17	1,12	1,07	1,00	0,93	0,86	0,79	0,71	0,61	0,50	0,36
	25	1,41	1,35	1,29	1,23	1,15	1,08	1,00	0,91	0,82	0,71	0,58	0,41

Таблица 7

Поправочные коэффициенты $k_{попр}$ к допустимым токовым нагрузкам для кабелей, лежащих рядом в земле, в трубах и без труб

Число кабелей	2	3	4	5	6
Для расстояния в свету 100 *мм*	0,90	0,85	0,80	0,78	0,75
Для расстояния в свету 200 *мм*	0,92	0,87	0,84	0,82	0,81
Для расстояния в свету 300 *мм*	0,93	0,90	0,87	0,86	0,85

Таблица 6

Значение сопротивления петли прямого и обратного проводов в омах на 1 *км* линии

Сечение провода, *мм²*		Значение z_1, *ом/км*					
прямого	обратного	Кабель и провода в трубах		Провода на роликах и изоляторах		Воздушная линия	
		Медные	Алюминиевые	Медные	Алюминиевые	Медные	Алюминиевые
1	1	37,6	—	37,6	—	—	—
1,5	1	31,3	—	31,3	—	—	—
1,5	1,5	25,0	—	25,0	—	—	—
2,5	1,5	20,0	—	20,0	—	—	—
2,5	2,5	15,0	25,4	15,0	25,4	—	—
4	2,5	12,4	20,6	12,4	20,6	—	—
4	4	9,5	16,0	9,5	16,0	—	—
6	4	7,9	13,2	7,9	13,2	—	—
6	6	6,32	10,6	6,32	10,6	—	—
10	6	5,06	8,45	5,07	8,53	—	—
10	10	3,8	6,4	3,84	6,5	3,7	—
16	10	3,09	5,2	3,13	5,25	3,05	—
16	16	2,38	4,0	2,43	4,03	2,41	3,89
25	16	1,95	3,29	2,02	3,32	2,03	3,23
25	25	1,53	2,58	1,60	2,62	1,66	1,58
35	16	1,73	2,91	1,8	2,95	1,82	2,88
35	35	1,08	1,82	1,18	1,88	1,26	1,9
50	25	1,14	1,93	1,23	1,98	1,34	2,05
50	50	0,76	1,28	0,893	1,36	0,984	1,54
70	35	0,825	1,37	0,935	1,45	1,03	1,48
70	70	0,565	0,92	0,7	1,02	0,82	1,09
95	50	0,592	0,98	0,74	1,08	0,936	1,19
95	95	0,417	0,684	0,60	0,79	0,72	0,847

Таблица 9

Потеря напряжения в трехфазной линии 380 *в* с учетом индуктивности проводов в процентах на 1 *квт·км*

Характеристика линии	Материал проводов	Коэффициент мощности cos φ	Потеря напряжения в процентах при сечении проводов									
			6	10	16	25	35	50	70	95	120	150
Кабели, провода в трубах и шнуры	Медь	0,75	2,18	1,33	0,873	0,554	0,413	0,308	0,231	0,176	0,146	0,122
		0,8	2,17	1,32	0,867	0,547	0,407	0,302	0,226	0,170	0,141	0,116
		0,85	2,16	1,31	0,861	0,541	0,401	0,297	0,220	0,164	0,135	0,111
		0,9	2,15	1,30	0,855	0,535	0,396	0,291	0,215	0,159	0,130	0,105
		0,95	2,14	1,30	0,847	0,528	0,389	0,284	0,208	0,152	0,123	0,099
	Алюминий	0,75	3,72	2,25	1,40	0,921	0,670	0,475	0,349	0,265	0,224	0,182
		0,8	3,71	2,24	1,39	0,914	0,664	0,469	0,344	0,260	0,218	0,177
		0,85	3,70	2,23	1,39	0,908	0,658	0,464	0,338	0,254	0,213	0,171
		0,9	3,69	2,22	1,38	0,902	0,653	0,458	0,333	0,249	0,207	0,166
		0,95	3,68	2,22	1,38	0,900	0,646	0,451	0,326	0,242	0,201	0,159
Провода на роликах и изоляторах внутри помещений	Медь	0,75	—	1,43	0,983	0,654	0,523	0,414	0,330	0,274	0,244	—
		0,8	—	1,41	0,957	0,63	0,498	0,393	0,310	0,253	0,224	—
		0,85	—	1,39	0,935	0,613	0,478	0,372	0,290	0,234	0,204	—
		0,9	—	1,36	0,915	0,591	0,456	0,349	0,268	0,213	0,183	—
		0,95	—	1,33	0,888	0,568	0,429	0,325	0,240	0,189	0,159	—

	Алюминий	0,75	—	2,36	1,51	1,02	0,778	0,580	0,447	0,364	0,322	—
		0,8	—	2,33	1,48	1,00	0,755	0,558	0,427	0,343	0,301	—
		0,85	—	2,31	1,46	0,980	0,735	0,538	0,408	0,324	0,282	—
		0,9	—	2,28	1,44	0,960	0,712	0,516	0,386	0,303	0,261	—
		0,95	—	2,25	1,41	0,935	0,686	0,490	0,363	0,279	0,237	—
Воздушные линии	Медь	0,75	2,36	1,51	1,05	0,723	0,578	0,467	0,384	0,324	0,290	—
		0,8	2,32	1,48	1,02	0,692	0,547	0,438	0,356	0,296	0,263	—
		0,85	2,29	1,45	0,985	0,660	0,517	0,409	0,328	0,269	0,236	—
		0,9	2,25	1,40	0,951	0,628	0,486	0,378	0,298	0,240	0,208	—
		0,95	2,20	1,36	0,913	0,590	0,450	0,344	0,265	0,208	0,177	—
	Алюминий	0,75	—	—	1,58	1,09	0,834	0,634	0,502	0,414	0,367	0,321
		0,8	—	—	1,54	1,06	0,804	0,604	0,474	0,386	0,340	0,295
		0,85	—	—	1,51	1,03	0,774	0,575	0,446	0,359	0,314	0,269
		0,9	—	—	1,48	0,995	0,742	0,545	0,416	0,330	0,286	0,242
		0,95	—	—	1,44	0,958	0,706	0,510	0,383	0,298	0,254	0,211

Примечание. Для определения потерь напряжения в трехфазной линии напряжением 220 *в* при помощи табл. 10 нужно данные этой таблицы умножать на 3.

Таблица 10

Потеря напряжения в линии без учета индуктивности проводов в процентах на 1 *квт·км* при напряжении линии 110—500 *в* и в процентах на 1 *квт·м* при напряжении линии 12—36 *в*

Характер линий	Номинальное напряжение, *в*	Материал проводов	Потеря напряжения в процентах при сечении проводов									
			1	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50
Трехфазная линия переменного тока	500	Медь	7,52	5,0	3,01	1,82	1,22	0,736	0,480	0,296	0,216	0,156
	380		13,0	8,66	5,22	3,15	2,12	1,28	0,832	0,513	0,374	0,270
	220		39,0	26,0	15,7	9,45	6,36	3,84	2,5	1,54	1,12	0,81
	500	Алюминий	—	—	5,08	3,17	2,11	1,27	0,784	0,508	0,364	0,252
	380		—	—	8,83	5,50	3,66	2,20	1,36	0,88	0,631	0,437
	220		—	—	26,5	16,5	11,0	6,6	4,08	2,64	1,89	1,31
Двухпроводная линия переменного или постоянного тока	220	Медь	78,0	52,0	31,4	18,9	12,7	7,68	5,00	3,08	2,24	1,62
	127		234,0	156,0	94,2	56,7	38,1	23,0	15,0	9,24	6,72	4,86
	110		311,0	208,0	125,0	75,3	50,7	30,6	20,0	12,3	8,93	6,47
	36		2,90	1,93	1,16	0,718	0,473	0,284	0,185	0,114	0,083	0,060
	12		26,2	17,4	10,45	6,47	4,25	2,56	1,67	1,05	0,750	0,542
	220	Алюминий	—	—	53,0	33,0	22,0	13,2	8,16	5,28	3,78	2,62
	127		—	—	159,0	99,0	66,0	39,6	24,5	15,8	11,3	7,86
	110		—	—	212,0	132,0	87,7	52,7	32,6	21,0	15,0	10,5
	36		—	—	1,96	1,23	0,818	0,490	0,303	0,196	0,141	0,097
	12		—	—	17,6	11,0	7,34	4,40	2,72	1,76	1,27	0,875

Цена 1 р. 50 к.

1 1 1961 года
Цена

„БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОМОНТЕРА"

Готовятся к печати

1. Амосов Б. В.—Устройство и эксплуатация сварочных генераторов и трансформаторов
2. Ильинский Н. В. — Расчет и выбор пусковых сопротивлений для электродвигателей
3. Каминский Е. А.—Изоляция оперативных цепей
4. Каминский Е. А.—Как сделать проект простейшей электроустановки
5. Камнев В. С. — Как работают подшипники электрических машин
6. Карпов Ф. Ф.—Как проверить допустимость подключения короткозамкнутого электродвигателя к сети
7. Боярченков М. А. — Магнитные усилители и их работа в схемах автоматики
8. Константинов Б. А. и Шулятьева Г. Н.— Коэффициент мощности (cos φ) и способы его повышения на промышленных предприятиях
9. Ларионов В. П. — Грозозащита сооружений и зданий
10. Лившиц Д. С. — Нагрев проводников и защита предохранителями в электросетях до 1 000 *в*
11. Найфельд М. Р.—Что такое защитное заземление и как его выполнять
12. Образцов В. А.—Уход за контактами низковольтных аппаратов
13. Осколков К. Н.—Электроизмерительные приборы и как ими пользоваться
14. Ривлин Л. Б.—Как определить неисправность асинхронного электродвигателя
15. Рябикин Б. П. — Скрытые виды проводок
16. Славенчинский И. С. и Хромченко Г. Е. — Пробивка отверстий и борозд в бетоне
17. Федотов Б. Н. — Схемы включения электрических счетчиков
18. Харитонов М. Г.—Опыт обслуживания и ремонта КРУ Запорожского завода
19. Хромченко Г. Е.—Соединение и оконцевание медных и алюминиевых проводов
20. Черепенин П. Г.—Монтаж асинхронных электродвигателей небольшой мощности
21. Шапиро Е. А. — Пружины электрических аппаратов