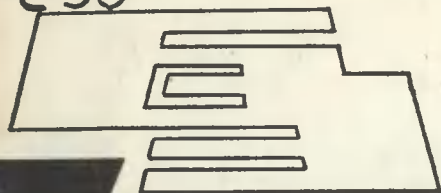


621.3  
С30



БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

А. М. СЕМЧИНОВ

# ТОКОПРОВОДЫ 6-10 кВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ



БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

ВЫПУСК 528

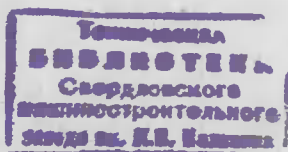
621.3

С 30

А.М. СЕМЧИНОВ

# ТОКОПРОВОДЫ 6-10 кВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

406801



DJVI

Scan  
AAW

ЛЕНИНГРАД  
ЭНЕРГОИЗДАТ  
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
1981

ББК 31.279

С 30

УДК 621.316.35

Редакционная коллегия:

Андреевский В. Н., Большам Я. М., Зевакин А. И., Каминский Е. А.,  
Ларионов В. П., Мусаэлян Э. С., Розанов С. П., Семенов В. А.,  
Смирнов А. Д., Трифонов А. Н., Устинов П. И., Филатов А. А.

Рецензент Г. П. Сидович

Алексей Матвеевич Семчинов

## ТОКОПРОВОДЫ 6—10 кВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Редактор Б. В. Смолов

Художественный редактор Д. Р. Стеванович

Технический редактор Р. К. Чистякова

Корректор С. Ф. Здобнова

ИБ № 796 („Энергия“)

Сдано в набор 20.02.81. Подписано в печать 22.06.81. М-28554  
Формат 84×108<sup>1</sup>/<sub>2</sub>. Бумага типографская № 1. Гарнитура литера-  
турная. Печать высокая. Усл. печ. л. 4,62. Уч.-изд. л. 4,39.  
Тираж 28 000. Заказ 4019. Цена 25 к.

Ленинградское отделение Энергоиздата. 191041, Ленинград, Мар-  
сово поле, 1.

Ленинградская типография № 2 головное предприятие ордена  
Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Тех-  
ническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при  
Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграф-  
ий и книжной торговли. 198052, г. Ленинград, Л-52, Измайловский  
проспект 29.

Семчинов А. М.

С 30

Токопроводы 6—10 кВ промышленных  
предприятий. — Л.: Энергоиздат. Ленингр.  
отд-ние, 1981. — 88 с., ил. — (Б-ка электромон-  
тера; Вып. 528).

25 к.

Приведены схемы электроснабжения промышленных пред-  
приятий с применением токопроводов 6—10 кВ. Рассмотрены  
факторы, определяющие технико-экономические показатели то-  
копроводов, их монтаж, защиту, заземление и эксплуатацию.  
Описаны устройство, основные параметры и характерные осо-  
бенности токопроводов разного типа.

Рассчитана на электромонтеров, работающих в области мон-  
тажа и эксплуатации токопроводов и ошинок распределитель-  
ных устройств 6—10 кВ.

С  $\frac{30311-116}{051(01)-81}$  80—81(Э).2302040000

ББК 31.279

6П2.13

© Энергоиздат, 1981

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В схемах электроснабжения промышленных предприятий с большой плотностью электрических нагрузок обычно требуется применение распределительных магистралей и отдельных линий большого сечения. Такие магистрали и линии могут быть выполнены либо несколькими параллельно проложенными кабелями, либо токопроводами. По сравнению с кабельными линиями токопроводы обладают большей надежностью и нагрузочной способностью и, как правило, позволяют упростить и удешевить схему электроснабжения.

В последние годы токопроводы все чаще используются при напряжении 6—10 кВ. Они различаются взаимным расположением фаз, формой и материалом шин, типом изоляторов, а также удельной стоимостью, удельными потерями и др.

Отзывы и пожелания по брошюре просьба направлять по адресу: 191041, Ленинград, Марсово поле, д. 1, Ленинградское отделение Энергоиздата.

## **1. СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТОКОПРОВОДОВ 6—10 КВ**

Построение схемы электроснабжения предприятия определяется мощностью и взаимным расположением потребителей, требованиями к бесперебойности питания, числом, мощностью, напряжением и расположением источников питания, значениями токов короткого замыкания (КЗ), особенностями генерального плана предприятия, а также конструктивными особенностями и технико-экономическими характеристиками выпускаемого промышленностью электротехнического оборудования, с помощью которого реализуется схема.

Мощность и расположение потребителей определяют пропускную способность, число и направление питающих линий. Требования к бесперебойности питания определяют степень резервирования отдельных элементов схемы (линий, трансформаторов, секций шин и пр.), необходимый уровень автоматизации, а иногда и конструкцию этих элементов. Число и расположение на генеральном плане источников питания определяют не только построение схемы, но и направление и протяженность электрических линий. От мощности источников питания зависит значение токов КЗ, которые в свою очередь обуславливают область рационального использования токопроводов и кабелей, параллельную или раздельную работу трансформаторов, типы и параметры коммутационных аппаратов, необходимость или отсутствие необходимости применения реакторов на линиях.

Существенное влияние на схему электроснабжения оказывают параметры выпускаемых заводами коммутационных аппаратов. Так, отсутствие выключо-

2

чателей на нужный номинальный ток или разрывную мощность может потребовать увеличения числа линий, установки реакторов, снижения мощности и увеличения числа трансформаторов.

Значение напряжения определяет не только рабочие токи линий и токи КЗ, но и предельно допустимую длину линий по условиям обеспечения необходимого уровня напряжения у электроприемников.

Промышленное предприятие может получать электроэнергию: а) от высоковольтной сети энергосистемы через одну или несколько понижающих подстанций; б) от своей или районной электростанции на генеральном напряжении; в) от электростанции и высоковольтной сети энергосистемы.

Обычно для распределительной сети пользуются напряжениями 6 и 10 кВ.

Потребителями промышленных предприятий, получающими питание при напряжении 6 и 10 кВ, в основном являются: мощные преобразовательные подстанции для электролиза и установки для электропривода, электропечные установки, цеховые трансформаторные подстанции и высоковольтные электродвигатели.

Преобразовательные подстанции для электролиза обычно имеют весьма большую мощность, измеряемую десятками, а иногда и сотнями тысяч киловольтампер. Распределительные устройства 10 кВ таких подстанций получают питание через мощные линии от распределительных устройств электростанций или понижающих подстанций 110—220/10 кВ. Выпрямительные агрегаты электролизных установок могут питаться непосредственно от распределительных устройств 10 кВ понижающих подстанций.

На современных мощных промышленных предприятиях число цеховых трансформаторных подстанций и высоковольтных электродвигателей велико и питание их непосредственно от распределительных устройств ГПП или ТЭЦ нецелесообразно. Для их питания помимо РУ ГПП и ТЭЦ сооружают несколько распределительных пунктов (РП) 6—10 кВ.

Питание распределительных пунктов от ГПП или ТЭЦ может быть выполнено либо кабельными линиями, либо токопроводами. Выбор способа канализации

электроэнергии производится в проекте электроснабжения предприятия на основе технико-экономического расчета. При сравнении кабелей и токопроводов помимо капитальных затрат и эксплуатационных расходов должны учитываться следующие факторы.

Токопроводы по сравнению с линиями, выполненными из большого числа параллельно проложенных кабелей, имеют преимущества в отношении надежности, удобства эксплуатации и возможности индустриализации электромонтажных работ. Токопроводы позволяют упростить схему электроснабжения и сделать ее более гибкой. Вместе с тем токопроводы характеризуются большим, чем у кабелей, индуктивным сопротивлением и большими потерями при одинаковой плотности тока. При сравнении токопроводов и кабельных линий эти качества в зависимости от конкретных условий могут иметь различную оценку.

Большое индуктивное сопротивление при значительной протяженности линии является недостатком, так как может вызвать недопустимую потерю напряжения. Напротив, если потеря напряжения в токопроводе находится в допустимых пределах, его повышенная индуктивность — в некоторых случаях качество положительное, так как ограничивает токи КЗ.

Увеличенные потери мощности в токопроводе по сравнению с кабельными линиями имеют место при одинаковой в обоих случаях плотности тока. Однако экономически целесообразная плотность тока в токопроводе ниже, чем в кабелях, и в результате потери мощности в токопроводе могут оказаться меньшими, чем в кабелях.

Стоимость токопровода и кабельных линий, в свою очередь, зависит от ряда факторов: конструкции токопровода, напряжения, передаваемой мощности, токов КЗ, схемы электроснабжения, способа прокладки, условий генплана и пр.

Как правило, при токах линий 2000 А и более технико-экономические расчеты показывают целесообразность применения токопроводов.

В соответствии с Инструкцией по проектированию электроснабжения промышленных предприятий (СН-174—75) магистральные токопроводы напряжением 6—10 кВ для токов более 1,5—2 кА, в связи с их более высокой надежностью, а также возможностью высокой степени индустриализации электромонтажных работ, следует применять преимущественно перед линиями, выполненными из большого числа параллельных кабелей: при напряжении 6 кВ — при длине токопровода до 2 км, а при напряжении 10 кВ — при длине до 3 км.

Для снижения капитальных затрат следует применять открытую прокладку токопровода во всех случаях, когда она возможна по условиям генплана.

Схема электроснабжения двух преобразовательных подстанций (ПП) с использованием токопроводов представлена на рис. 1. Для питания четырех серий электролизных ванн предусмотрена установка четырех рабочих понижающих трансформаторов и одного резервного такой же мощности.

Резервный трансформатор через обходную систему шин может заменить любой из рабочих трансформаторов. Для уменьшения токов КЗ параллельная работа трансформаторов не предусматривается. Связь трансформаторов со сборными шинами выполняется токопроводами. Распределение энергии по выпрямительным агрегатам осуществляется шинами. С этой целью шины распределительного устройства 10 кВ проложены вдоль всего здания ПП, а камеры масляных выключателей выпрямительных агрегатов рассредоточены вдоль здания ПП по осям соответствующих агрегатов.

Рассредоточенное размещение камер выключателей 10 кВ вместо централизованного позволяет: повысить надежность питания выпрямительных агрегатов за счет замены кабельных связей между РУ-10 кВ и агрегатами шинными связями; использовать сборные шины РУ-10 кВ не только для распределения энергии по выпрямительным агрегатам, но и для передачи питания от резервного трансформатора на преобразовательные установки всех четырех серий. Показанное на нижней части рис. 1 взаимное



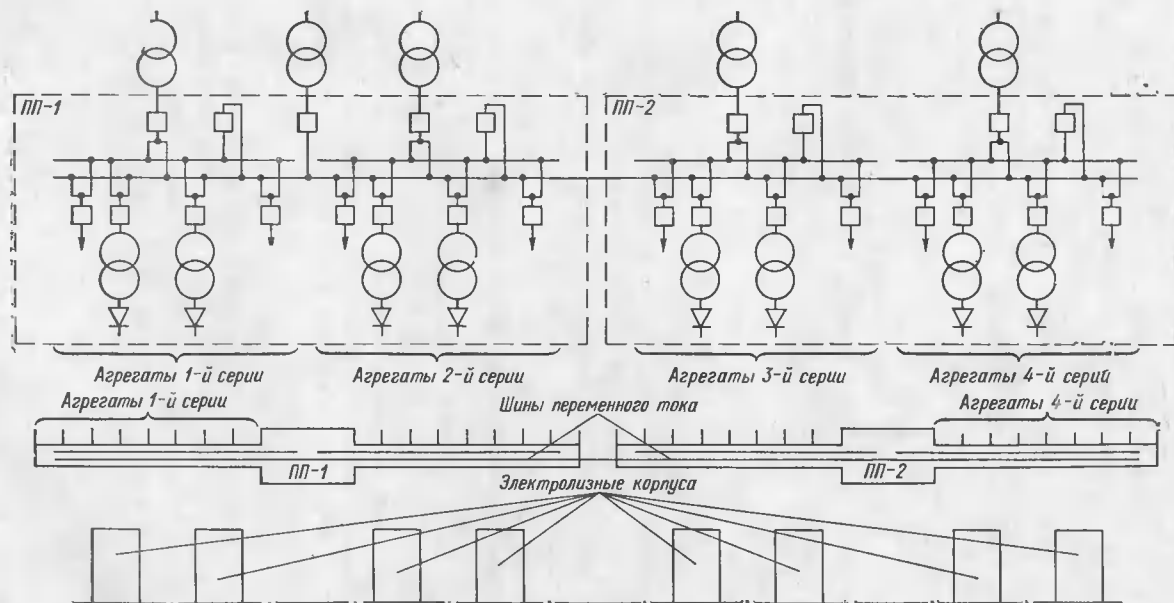


Рис. 1. Схема питания преобразовательных подстанций алюминиевого завода и план взаимного расположения подстанций и электролизных корпусов

расположение ПП и электролизных корпусов иллюстрирует такое резервирование.

На рис. 2 приведена схема питания ПП электролизных серий мощностью свыше 100 МВт каждая. В этом случае каждая серия получает питание от одного понижающего трансформатора с расщепленными обмотками на стороне 10 кВ. Для снижения токов КЗ каждая из расщепленных обмоток работает отдельно. Резервным трансформатором можно заменить любой рабочий, однако для исключения параллельной работы расщепленных обмоток схему обходных шин в этом случае пришлось усложнить.

Для связи трансформаторов с шинами РУ-10 кВ, для распределения энергии между выпрямительными агрегатами и для резервных связей ПП отдельных серий применены токопроводы.

Схема электроснабжения с использованием токопроводов для питания нескольких РП (рис. 3) широко применяется на предприятиях различных отраслей промышленности. На вводах предусмотрена установка реакторов, снижающих ток КЗ до значения, которое позволяет применить на подстанциях дешевые и малогабаритные выключатели, а также снизить допустимые по термической устойчивости сечения кабелей.

Наличие реакторов облегчает также осуществление избирательной релейной защиты подстанций и токопроводов.

При использовании токопроводов в схемах электроснабжения любой потребитель, как правило, может получать питание от двух цепей токопроводов.

В нормальных условиях каждая цепь токопровода несет половину общей нагрузки, а в аварийных условиях — при выходе из строя одной из цепей — всю нагрузку. Поэтому по нагреву каждая цепь токопровода должна быть рассчитана на общую нагрузку обеих его цепей.

Наиболее распространены в настоящее время симметричный подвесной самонесущий токопровод с жесткими шинами (рис. 4) и симметричный гибкий токопровод (рис. 5).

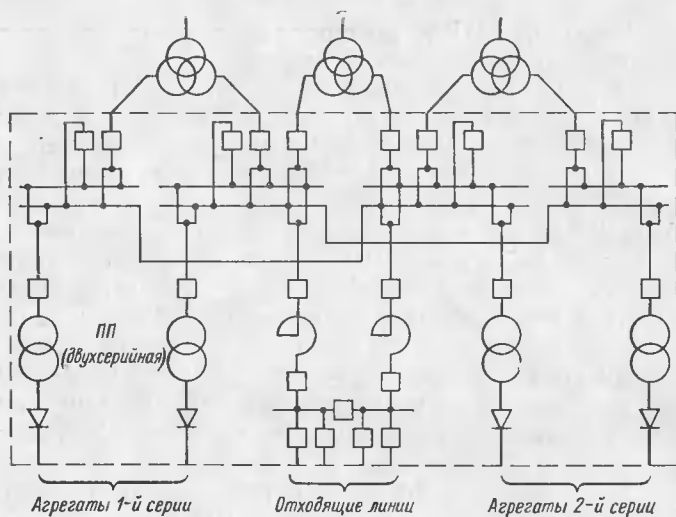


Рис. 2. Схема питания ПП от трансформаторов с расщепленными обмотками

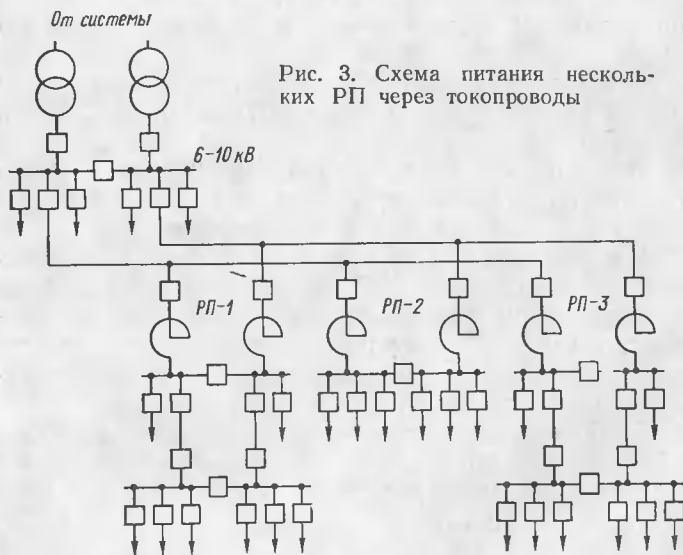


Рис. 3. Схема питания нескольких РП через токопроводы

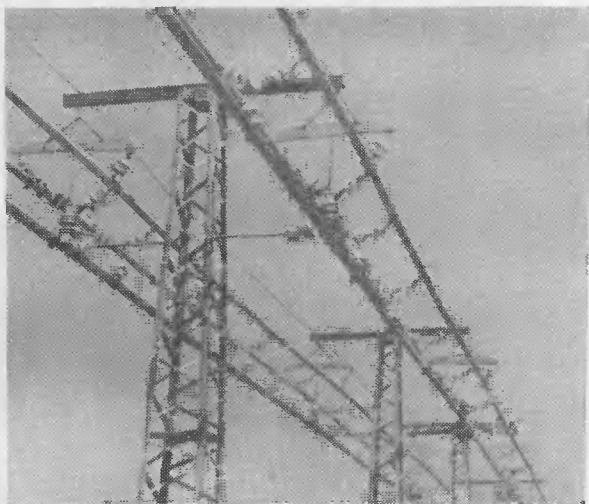


Рис. 4. Симметричный подвесной самонесущий токопровод с жесткими шинами

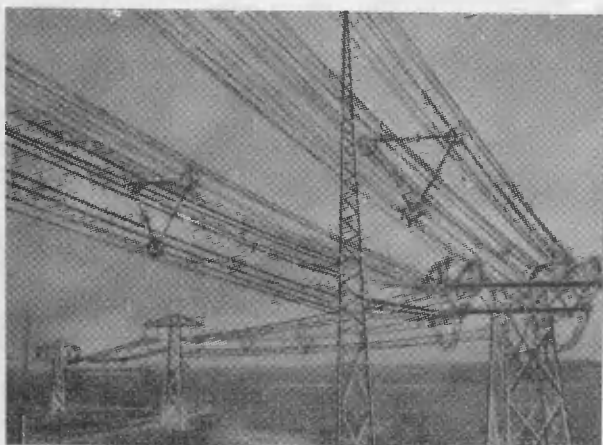


Рис. 5. Симметричный гибкий токопровод

## **2. ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТОКОПРОВОДОВ**

**Основные технико-экономические показатели токопроводов:** надежность, стоимость, потери мощности и напряжения, а также удобство монтажа и эксплуатации — зависят от следующих факторов: а) рабочего тока и напряжения; б) расчетного тока КЗ в сети; в) материала, формы и размеров сечения шин; г) взаимного расположения шинных пакетов разных фаз; д) материала, формы и веса поддерживающих и ограждающих конструкций; е) материала и конструкции шинодержателей; ж) типа и запаса примененной изоляции; з) материала и конструкции строительных элементов.

С увеличением рабочего тока абсолютная стоимость токопровода возрастает, а относительная (на единицу передаваемой мощности) уменьшается. Это объясняется тем, что из всех составляющих полную стоимость токопровода только стоимость шин и их монтажа находится в прямой зависимости от тока. Стоимость остальных элементов токопровода: изоляторов, поддерживающих, ограждающих, а также строительных конструкций — практически не зависит от сечения шин и рабочего тока.

С увеличением расчетного тока КЗ стоимость токопровода увеличивается, так как электродинамические усилия между шинами возрастают пропорционально квадрату тока КЗ, а следовательно, в такой же пропорции возрастает стоимость изоляторов и поддерживающих конструкций.

С повышением напряжения стоимость токопровода, как правило, уменьшается, так как при этом снижается величина рабочего тока и тока КЗ, а следовательно, уменьшаются вес шин и электродинамические усилия между шинами. Особенно благоприятен в этом отношении переход от 6 к 10 кВ, так как тип изоляторов в обоих случаях, как правило, сохраняется один и тот же.

Надежность токопровода обеспечивается нормированным запасом прочности его отдельных элемен-

тов и учетом в его конструкции условий среды, монтажа и эксплуатации. Степень надежности должна соответствовать условиям применения, поскольку повышенная надежность связана с удорожанием. Так, весьма надежные токопроводы с отдельными защитными кожухами для каждой фазы, по существу исключают междуфазные КЗ, из-за высокой стоимости находят весьма ограниченное применение.

При разработке токопроводов и их отдельных элементов, а также при сравнении токопроводов разных конструкций необходимо учитывать неравномерность распределения тока по сечению шин и проводов и связанные с этим дополнительные потери мощности, а также потери мощности в близлежащих к токопроводу металлических частях.

**Распределение тока по сечению проводников.** Постоянный ток распределяется по всему сечению проводника любой формы практически равномерно, если материал проводника однороден и имеет одинаковую температуру во всех точках. При неодинаковой температуре в различных элементах сечения, что может иметь место в пакете, состоящем из нескольких шин с разными условиями охлаждения, постоянный ток распределяется по сечению неравномерно. Наибольшая плотность тока будет в наружных, лучше охлаждаемых шинах.

Переменный ток, даже в однородном проводнике с одинаковой температурой, распределяется по сечению неравномерно, причем степень неравномерности зависит от формы сечения и материала проводника, от частоты тока, а также от наличия или отсутствия вблизи других, обтекаемых током проводников. При протекании переменного тока в уединенном проводнике ток в каждом элементе его сечения находится под воздействием как собственного магнитного поля, так и магнитных полей токов прочих элементов сечения. Элементы внутренних слоев сечения подвержены влиянию более сильных магнитных полей, чем элементы, расположенные ближе к наружной поверхности, вследствие чего их индуктивное и полное сопротивление возрастают в направлении от наружной поверхности к внутренним слоям. Происходит вытеснение тока в поверхностные слои, вызывающие

увеличение потерь мощности в проводнике по сравнению с теми, которые имели бы место при равномерном распределении тока по сечению. Явление вытеснения переменного тока от внутренних к поверхностным слоям проводника называется поверхностным эффектом.

В уединенных проводниках круглого или кольцевого сечения плотность тока плавно увеличивается в направлении к внешним слоям. В проводниках другой формы сечения ток распределяется неравномерно не только по сечению, но и по периметру. Наибольшая плотность тока имеет место на наиболее удаленных, выступающих, элементах сечения.

Если отношение активного сопротивления к индуктивному увеличивается, то неравномерность распределения тока по сечению уменьшается. Поэтому она у алюминия меньше, чем у меди, а в нагретом проводнике меньше, чем в холодном.

Для более полного использования сечения проводника при переменном токе, а также для улучшения условий охлаждения алюминиевые и медные шины всех форм и размеров, как правило, изготавливаются толщиной не более 10—12 мм.

Если два или несколько проводников с током расположены так, что их магнитные поля существенно влияют друг на друга, то происходит перераспределение тока по сечению этих проводников по сравнению с тем распределением, какое было бы в уединенных проводниках. Это явление называется эффектом близости. Перераспределение зависит от направления токов в соседних проводниках, формы проводников, расстояния между ними, а также от частоты тока.

Эффект близости может приводить как к увеличению неравномерности токораспределения, так и к уменьшению ее. При двух параллельно расположенных проводниках круглого или кольцевого сечения с токами одного направления происходит дополнительное вытеснение токов к наружным слоям сечений, а при токах противоположных направлений — к внутренним, обращенным друг к другу слоям. В обоих случаях неравномерность распределения тока по сечению увеличивается и, следовательно, активное сопротивление возрастает.

В проводниках прямоугольного сечения наблюдается аналогичное перераспределение тока, однако оно не всегда приводит к увеличению неравномерности и активного сопротивления. Если шины прямоугольного сечения расположены широкими сторонами друг к другу и ток в них протекает в одном направлении, то он вытесняется к внешним сторонам шин и неравномерность увеличивается.

Если же ток протекает в противоположных направлениях, то он вытесняется к внутренним, обращенным друг к другу сторонам. Но так как поля шин направлены навстречу друг другу и результирующее поле мало, общая неравномерность распределения тока при этом уменьшается. Уменьшается также эквивалентное активное и индуктивное сопротивление шин.

— Степень неравномерности распределения переменного тока по сечению проводника характеризуется коэффициентом добавочных потерь

$$k_d = \frac{\Delta P_{\sim}}{\Delta P_0} = \frac{I^2 R_{\sim}}{I^2 R_0} = \frac{R_{\sim}}{R_0}, \quad (1)$$

где  $\Delta P_{\sim}$  — джоулевы потери в проводнике при переменном токе;  $\Delta P_0$  — джоулевы потери в проводнике при постоянном токе той же величины;  $R_{\sim}$  — эквивалентное активное сопротивление проводника переменному току;  $R_0$  — сопротивление проводника постоянному току.

Коэффициент добавочных потерь уединенного проводника отличается от коэффициента добавочных потерь того же проводника при наличии вблизи него других проводников с током, так как в первом случае неравномерность токораспределения определяется только поверхностным эффектом, а во втором — также и эффектом близости. По этой же причине коэффициент добавочных потерь пакета, состоящего из нескольких одинаковых шин, не равен коэффициенту добавочных потерь каждой из этих шин.

У трехфазных токопроводов при расстояниях между фазами больше 8—10-кратного поперечного размера шин влияние эффекта близости на токораспределение незначительно и коэффициент дополнительных потерь в шинах можно принять равным коэффициенту



дополнительных потерь в уединенной шине (табл. 1). При меньших расстояниях влияние эффекта близости может существенно изменить коэффициент добавочных потерь.

Таблица 1

Форма сечения алюминиевых шин	Число шин	Размеры сечения, мм	Коэффициент добавочных потерь
Прямоугольная	1	100×10	1,18
	2	110×10	1,25
	3	100×10	1,60
	4	110×10	1,72
Прямоугольная, собранный по сторо- нам квадрата	4	80×8	1,04
	4	100×10	1,07
Коробчатая из двух корытных про- филей	2	100×45×6	1,035
	2	125×55×6,5	1,05
	2	150×65×7	1,08
	2	175×80×8	1,11
	2	200×90×10	1,18
«Труба круглая»	1	100/90*	1,01
	1	140/120	1,02
	1	210/190	1,03
	1	250/230	1,03
* В числителе — наружный диаметр, в знаменателе — внутренний.			

При выполнении фазы токопровода из нескольких шин прямоугольного сечения наружные шины несут большую нагрузку, чем внутренние. Увеличение числа шин в пакете сверх трех, как правило, нерационально, так как основную нагрузку, определяющую пропускную способность пакета по нагреву, несут наружные шины, внутренние же несут часть нагрузки, почти не зависящую от числа шин.

При выполнении пакета из прямоугольных шин, расположенных по сторонам квадрата, можно значительно снизить потери, обусловленные поверхностным эффектом. При этом улучшаются условия охлаждения шин и возрастает допустимая токовая нагрузка. Однако такое выполнение пакетов шин токопроводов

из-за сложности и трудоемкости изготовления в настоящее время не применяется. Наиболее широко для токопроводов 6—10 кВ применяются пакеты, выполненные из двух сваренных между собой шин корытного профиля, а также профилей «двойное Т» и «труба круглая» (рис. 6). Шины таких профилей изготавливаются как из алюминия, так и из алюминиевых сплавов марок АД31Т1 и АД31Т.

Пакет из двух шин корытного профиля обладает большой механической прочностью, достаточно хорошими условиями охлаждения и малым коэффициентом добавочных потерь. Для обеспечения хороших условий охлаждения и удобства крепления на изоляторах два корытных профиля сваривают между собой с некоторым просветом. Расстояние между сварными перемычками выбирается в зависимости от расчетной величины тока КЗ. Сварка перемычек и требующаяся перед этим рихтовка профилей весьма трудоемки.

Профиль «двойное Т» обладает большой механической прочностью. Его применение позволяет значительно сократить объем работ по изготовлению и монтажу токопроводов, так как уменьшается объем сварочных работ и не требуется рихтовки. Наличие внутренней перемычки позволяет не считаться с электродинамическими усилиями, возникающими между половинками профиля при коротком замыкании. Вместе с тем внутренняя перемычка имеет и отрицательное значение — ее сечение равно 20% площади общего сечения профиля, а ток, который она несет, не превышает 10—13%. Вследствие этого коэффициент добавочных потерь профиля «двойное Т» выше, чем у корычатых шин из двух корытных профилей.

Профиль «труба круглая» имеет наилучшее токораспределение по сравнению со всеми упомянутыми выше профилями. Малый коэффициент добавочных потерь трубы в значительной степени искупает худшие

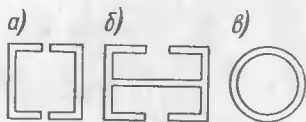


Рис. 6. Профильные шины:  
а — корычатого сечения из двух корытных профилей,  
б — профиль «двойное Т»,  
в — «труба круглая»

условия охлаждения. При изготовлении и монтаже токопроводов на подвесных изоляторах труба более удобна, чем другие профили.

Для гибких подвесных токопроводов применяют пучки голых многопроволочных проводов, равномер-

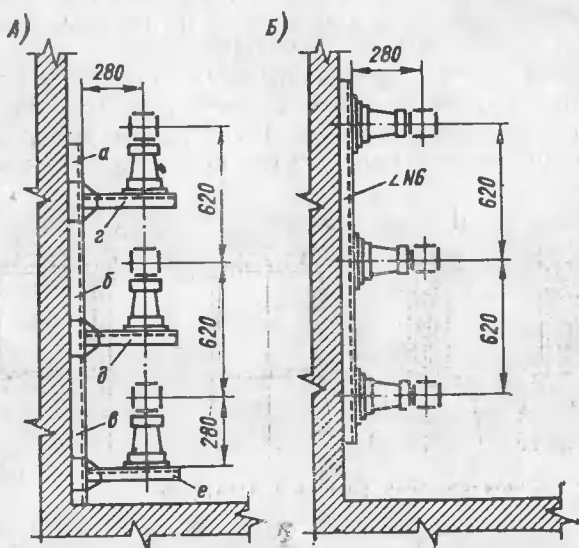


Рис. 7. Опорные конструкции токопровода

Элементы конструкции	а	б	в	г	д	е
Температура нагрева, °С	6,5	16,0	24,5	36	33	9,5
Потери мощности, Вт	69 (суммарные для а, б, в)			86	86	19

но распределенных по периметру кольца. Для уменьшения коэффициента добавочных потерь в таких токопроводах осуществляют непрерывную транспозицию проводов в пучке путем его скручивания.

**Потери активной мощности в металлических частях, находящихся вблизи токопроводов.** Протекание переменного тока по токопроводу сопровождается по-

терями активной мощности в близлежащих металлических частях: шинодержателях и металлических деталях изоляторов, опорных конструкциях, ограждениях и кожухах, а также в металлических элементах строительных конструкций. Если металлические части немагнитные, в них имеются потери от индуцированных вихревых токов, а если магнитные, то, кроме того, и гистерезисные потери.

Потери в металлических частях зависят от их материала и величины тока, а также от расположения этих частей и их удаленности от фаз. Насколько расположение конструкций влияет на потери, можно су-

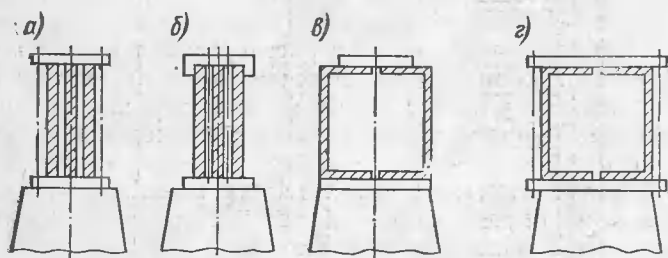


Рис. 8. Шинодержатели разных конструкций.

дить по рис. 7. В подрисуночной подписи указаны расчетные потери мощности и найденная опытным путем температура нагрева при токе 2460 А для каждого элемента конструкции (а—е) — рис. 7, А. Наибольшие потери и температура нагрева имеют место в полках между фазами. Потери мощности в поддерживающей конструкции (рис. 7, Б) будут примерно в 3 раза меньше, чем в конструкции (рис. 7, А), поскольку здесь отсутствуют элементы г, д, е. Особенно большие потери и недопустимый нагрев будут в случае, если металлическая конструкция из магнитного материала охватывает какую-либо из фаз.

Опытами по определению потерь мощности в шинодержателях шинного пакета 3(100×10) (рис. 8) при токе 2970 А еще более наглядно выявлено влияние материала и расположения металлических частей на потери в них. Потери мощности в одном комплекте при двух стальных шпильках составляли 89, при

одной стальной и одной латунной — 49, при двух латунных шпильках — 4 Вт. Аналогичные результаты получились и при других сечениях и токах.

Замена стальных шпилек более дорогими немагнитными окупается за счет разницы в стоимости потерь электроэнергии, как правило, за несколько месяцев.

При том же шинном пакете и токе 3000 А, но при ином расположении шпилек шинодержателя (рис. 8, б) потери при обеих стальных шпильках снизились до 7 Вт. Это объясняется тем, что в данном случае шпильки расположены в зонах, где магнитные потоки, создаваемые токами правой и левой шин, направлены противоположно и результирующий поток мал. Потери в шпильках по рис. 8, в малы по той же причине, и их можно изготавливать из стали. Потери в шпильках по рис. 8, г будут велики, так как расположение шпилек аналогично расположению на рис. 8, а.

Следует отметить, что потери в шинодержателях в целом определяются деталями, размещенными вдоль высоты пакета шин. Потери в деталях, расположенных против узких сторон шин, значительно меньше, и эти детали могут быть стальными. При нерациональном расположении магнитных деталей шинодержателей нагрев их вследствие значительных потерь достигает 150—200 °С. Потери мощности в поддерживающих конструкциях токопроводов с фазами в одной плоскости могут быть значительно снижены при замене стальных конструкций конструкциями из немагнитных алюминиево-магниевого сплава.

Для токопроводов с симметричным расположением фаз (см. рис. 14) замена в поддерживающих конструкциях стали немагнитным материалом не нужна, так как и при стальных конструкциях потери в них весьма малы, что объясняется сравнительно малыми размерами конструкций в этом типе токопровода и малой величиной результирующего магнитного поля в зоне их расположения.

**Материалы, формы, размер и расположение шин.** В качестве проводникового материала для шин токопроводов 6—10 кВ в настоящее время, как правило, применяется алюминий с удельным сопротив-

лением  $0,029 \cdot 10^{-6}$  Ом·м ( $0,029$  Ом·мм<sup>2</sup>/м) при 20 °С, с пределом прочности  $68,7 \cdot 10^6$  Па (7 кгс/мм<sup>2</sup>), алюминиевый сплав марки АД31Т1 с удельным сопротивлением  $0,0325 \cdot 10^{-6}$  Ом·м ( $0,0325$  Ом·мм<sup>2</sup>/м) при 20 °С, с пределом прочности  $196 \cdot 10^6$  Па (20 кгс/мм<sup>2</sup>), а также алюминиевый сплав марки АД31Т с удельным сопротивлением  $0,035 \cdot 10^{-6}$  Ом·м ( $0,035$  Ом·мм<sup>2</sup>/м) при 20 °С и пределом прочности  $127 \cdot 10^6$  Па (13 кгс/мм<sup>2</sup>). Медь используется лишь в виде исключения для среды, где алюминий химически нестойк, или в установках с длительными интенсивными вибрациями.

Широкое применение алюминия и алюминиевых сплавов объясняется не только меньшей дефицитностью их, но и рядом преимуществ перед медью, основным из которых является меньшая стоимость. Так, если исходить из одинаковых потерь электроэнергии в ошиновке, сечение алюминиевых шин по сравнению с медными необходимо увеличить в 1,7 раз, при этом вес алюминиевых шин будет равен 52% веса медных, а стоимость алюминиевых шин составит 47% стоимости медных.

К недостаткам алюминия относится меньшая, чем у меди надежность болтовых соединений и меньшая прочность. Первый из этих недостатков практически не имеет существенного значения для токопроводов, так как в них, как правило, болтовые соединения заменяются сваркой. Когда же требуется повышенная прочность, вместо меди с успехом применяются соответствующие алюминиевые сплавы.

Стоимость шин зависит от нескольких факторов: материала, формы сечения и способа изготовления. При разработке проекта токопровода материал и форму шин выбирают на основании технико-экономического расчета, а также по конструктивным и монтажным соображениям.

Размеры сечения шин принимаются по допустимому нагреву максимальным расчетным током и по экономической плотности тока в нормальном рабочем режиме. Выбранное сечение проверяется на термическую и динамическую устойчивость при коротких замыканиях.

За максимальный расчетный ток принимается ток получасового максимума нагрузки, который будет иметь место при аварийном выходе из строя или отключении на ремонт одной из двух цепей двухцепного токопровода и переключении всей нагрузки на оставшуюся в работе цепь. Максимальная допустимая температура нагрева шин и голых проводов равна 70°C. Допустимые токовые нагрузки шин прямоугольного сечения и коробчатого из двух корытных профилей приведены в Правилах устройства электроустановок (ПУЭ). Допустимые нагрузки (полученные расчетом) шин профилей «труба круглая» и «двойное Т» при температуре окружающего воздуха +25°C даны в табл. 2.

Таблица 2

Профиль	Размеры сечения, мм	Площадь сечения, м <sup>2</sup>	Допустимый длительный ток, А			
			для алюминиевых шин		для шин из сплава АД31Т1	
			окрашенных	неокрашенных	окрашенных	неокрашенных
«Труба круглая»						
№ 27	100/90*	1500	2840	2280	2700	2170
№ 28	140/120	4082	5240	4180	5040	3950
№ 30	210/190	6200	8000	6280	7580	5920
№ 32	250/230	7500	9650	7520	9100	7150
«Двойное Т»						
№ 2	80×100×8	2308	3650	3160	3420	2970
№ 3	100×130×8	3288	4840	4170	4590	3920
№ 4	120×150×10	5000	6650	5680	6250	5350
№ 5	150×180×10	6200	7760	6550	7300	6150

\* В числителе — наружный диаметр, в знаменателе — внутренний.

В трехфазных токопроводах 6—10 кВ фазные шины (или пучки проводов) располагают либо в одной плоскости (вертикальной или горизонтальной), либо симметрично — по углам разностороннего тре-

угольника. При симметричном расположении обеспечиваются одинаковое сопротивление всех фаз и меньшие потери электроэнергии. Поэтому в настоящее время симметричное расположение фаз применяется как правило, а расположение фаз в одной плоскости — как исключение, когда это требуется конструктивными соображениями.

**Экономическая плотность тока** в шинах токопроводов определяется стоимостью электроэнергии, удельными потерями мощности в проводниковом материале (на 1 А передаваемого тока), графиком нагрузки токопровода, а также стоимостью шин и других конструктивных элементов, зависящих от плотности тока.

Экономическая плотность тока понижается с удорожанием электроэнергии и увеличением удельных потерь мощности в шинах, а также с увеличением продолжительности использования максимума нагрузки. Высокая стоимость шин, напротив, приводит к повышению экономической плотности. Она будет меняться также с изменением формы сечения шины (при неизменных размерах сечения), так как при этом меняются удельные потери мощности, а нередко и стоимость самих шин. От длины токопровода экономическая плотность тока не зависит.

Экономическая плотность соответствует такому сечению, при котором приведенные затраты будут наименьшими. Экономическая плотность тока определяется специальным расчетом. Для симметричных токопроводов 6—10 кВ с жесткими и гибкими шинами при трехфазной работе предприятия экономическая плотность тока, как правило, находится в пределах 0,5—0,75 А/мм<sup>2</sup>.

**Способы прокладки токопроводов.** Токопроводы высокого напряжения прокладывают преимущественно на открытом воздухе — на отдельно стоящих опорах или консолях, закрепленных на стенах или колоннах зданий, в ряде случаев — в закрытых надземных галереях и внутри производственных помещений и как исключение — в подземных туннелях.

Прокладка в туннеле имеет следующие недостатки: высокую стоимость строительных работ, особенно на площадках со скальным грунтом или на



площадках с высоким уровнем грунтовых вод, где требуется гидроизоляция; пониженную надежность токопровода из-за возможности проникновения в туннель грунтовых или ливневых вод, а также грызунов, что может вызвать перекрытие шин; необходимость устройства принудительной вентиляции для удаления тепловыделений; более сложное выполнение ответвлений от токопровода и вводов в подстанции.

Положительным свойством туннельной прокладки является отсутствие надобности в молниезащите.

Размещать токопроводы в туннелях допускается лишь тогда, когда производственная среда или застройка территории исключает другие, более экономичные способы прокладки.

Закрытые галереи сооружаются либо непосредственно на поверхности земли, либо на специальных опорах на высоте 5—6 м от уровня планировочной площадки. Первый вариант дешевле, но он допустим только при условии, что галерея не пересекается проездами и проходами. Кроме того, при таком выполнении галереи имеется повышенная опасность проникновения в нее грызунов.

Если позволяет направление трасс, опоры шинной галереи иногда с целью удешевления совмещают с опорами технологических трубопроводов. Однако такое совмещение противоречит типизации строительного оформления токопроводов. Другой способ удешевления галереи — прокладка по крышам зданий или вплотную к стене с креплением на консолях.

Помимо меньшей стоимости, прокладка токопроводов в галереях имеет следующие преимущества перед прокладкой в туннеле: большую надежность; достаточность естественной вентиляции (в большинстве случаев); более удобное выполнение ответвлений и вводов в подстанции.

Прокладка токопроводов на открытом воздухе наиболее экономична. Стоимость строительной части токопровода при этом в несколько раз меньше, чем при прокладке в туннеле или галерее. Стоимость же собственно токопровода мало отличается от стоимости токопровода при прокладке в галерее или туннеле, так как, с одной стороны, возрастает стоимость

изоляторов, а с другой — отпадает необходимость в ограждающих конструкциях.

К недостаткам прокладки на открытом воздухе относятся: более активное в ряде случаев воздействие окружающей среды; необходимость соблюдения нормированных расстояний до зданий, сооружений и проходов; некоторое усложнение обслуживания.

В настоящее время имеется достаточно большой опыт эксплуатации токопроводов различного исполнения на предприятиях с разной степенью загрязнения атмосферы, в частности на глиноземных и алюминиевых заводах, а также на горнообогатительных комбинатах, шинных и резинотехнических заводах, предприятиях по производству искусственного волокна.

На этих предприятиях длительное время эксплуатируются токопроводы различных исполнений: симметричные и несимметричные, закрытые — проложенные в галереях и туннелях и токопроводы, проложенные на открытом воздухе. На одном из глиноземных заводов, воздушная среда которых характеризуется наличием большого количества спековой пыли с содержанием щелочи, более десяти лет безаварийно эксплуатируется открытый симметричный подвесной токопровод 10 кВ с жесткими шинами и опорными изоляторами на 35 кВ типа ИШД-35. На другом аналогичном заводе в течение шести лет эксплуатируется симметричный подвесной токопровод 10 кВ, проложенный в закрытой галерее. В токопроводе используются изоляторы на 20 кВ для внутренней установки (типа ОМЕ-20). Кровля и боковые стенки галереи выполнены из волнистой асбофанеры. За время эксплуатации на токопроводе произошло несколько КЗ, которые, как правило, наступали из-за проникновения влаги через отверстия и неплотности в стенах и кровле галереи. На алюминиевых заводах, в атмосфере которых большое количество копоти от электролизных ванн и цехов анодной массы, в течение многих лет безаварийно работают открытые симметричные подвесные токопроводы 10 кВ как на опорных изоляторах ИШД-35, так и на подвесных изоляторах для загрязненных условий типа НС-2 — по одному изолятору на фазу.

Результаты обследования девяти горнообога-тельных комбинатов с токопроводами, проложенными на открытом воздухе и в галереях, показали, что повреждаемость таких токопроводов, за исключением участков примыкания токопроводов к зданиям, практически одинаковая. На участках примыкания у открытых токопроводов наблюдались случаи КЗ из-за попадания на шины посторонних предметов (с верхних этажей и кровли), либо из-за попадания на участки примыкания сточных вод с кровли зданий. Повысить надежность мест примыкания открытого токопровода к зданиям можно, устроив над ним, на участке примыкания длиной 6—12 м, кровлю. Опыт эксплуатации позволяет утверждать, что открытые токопроводы 6—10 кВ при условии повышенной изоляции, например применении изоляторов типа ИШД-35 или двух подвесных изоляторов на фазу (типа ПФГ-6А или ПСГ-6А), и защиты мест примыкания от попадания посторонних предметов и сточных вод, являются более надежными, чем токопроводы, прокладываемые в закрытых галереях на опорных изоляторах 20 кВ для внутренней установки.

Помимо повышения надежности, применение открытых токопроводов с усиленной изоляцией позволяет значительно снизить капитальные затраты по сравнению с затратами на токопроводы в закрытой галерее. Это обстоятельство учтено в «Инструкции по проектированию электроснабжения промпредприятий» (СН-174—75), которая требует применения открытых токопроводов вне зависимости от условий воздушной среды.

**Сварные соединения шин.** В токопроводах с жесткими шинами из алюминия и алюминиевых сплавов АД31Т и АД31Т1 соединение шин выполняется при помощи сварки, имеющей по сравнению с болтовыми соединениями следующие преимущества: отпадает необходимость в крепежных деталях; экономятся шины за счет ликвидации нахлестки; повышается производительность труда на монтаже; повышается надежность соединения и облегчается эксплуатация; снижаются потери электроэнергии за счет отсутствия потерь в контактных соединениях.

Сварные соединения шин должны обеспечивать механическую прочность в месте сварки не ниже прочности отожженного металла, проводимость — не ниже проводимости целой шины; стойкость соединения против коррозии при воздействии внешней среды. Наилучшее качество сварного шва получается при аргонно-дуговой сварке. Для шин из алюминия и алюминиевых сплавов, прокладываемых на открытом воздухе, в сырых помещениях и в помещениях с химически агрессивной средой, только этот вид сварки гарантирует сварные соединения от коррозии. Аргонно-дуговая сварка выполняется без применения флюса, с непрерывной обдувкой зоны сварки аргоном, предохраняющим расплавленный металл от окисления. При толщине шин до 12 мм может применяться ручная аргонно-дуговая сварка неплавящимся (вольфрамовым) электродом. Сварка производится на переменном токе с помощью установок УДАР и УДГ; изготавливаемых на токи до 200 А. Для заполнения и формирования шва в сварочную ванну вводится прищадочный прутки из материала шин.

Наилучшим способом аргонно-дуговой сварки является полуавтоматическая сварка плавящимся электродом, выполняемая на постоянном токе. Этот способ сварки применяется при толщине шин 6—30 мм. Он в три раза производительней, чем сварка вольфрамовым электродом. Для полуавтоматической сварки применяется устройство типа ПРМ-2, имеющее максимальный сварочный ток 400 А. Газ от баллона к зоне сварки подводится через мундштук сварочной головки. Через него же специальным механизмом подается электродная проволока, между концом которой и свариваемыми кромками поддерживается вольтова дуга. Проволока, расплавляясь, заполняет сварочный шов. При сварке шин толщиной более 15 мм необходим предварительный подогрев места сварки до 200—250 °С посторонним источником тепла.

Для ошиновки, прокладываемых в закрытых помещениях с нормальной средой, в случае отсутствия аргонно-дуговой сварки применяют сварку угольным электродом с использованием флюса. Такая же сварка применяется для тяжелой ошиновки электролизных

цехов и преобразовательных подстанций. Сварка может выполняться на переменном токе (при толщине шин до 12 мм) до 450 А и на постоянном токе до 1500—2000 А. Недостатком этого способа сварки является большое количество флюса, который остается на поверхности шва и в последующем может вызвать коррозию.

При сварке шин и профилей из сплава АД31Т1 происходит отжиг шин в месте сварки. Зона отжига в зависимости от степени нагрева при сварке распространяется на 30—70 мм в каждую сторону от сварного шва. В результате отжига предел прочности снижается с  $196 \cdot 10^6$  Па (для закаленной шины) до  $(157 \div 167) \cdot 10^6$  Па при полуавтоматической аргонодуговой сварке и до  $(98 \div 107) \cdot 10^6$  Па при ручной с неплавящимся электродом. Столь низкая механическая прочность соединений, выполняемых ручной аргонодуговой сваркой, объясняется увеличенной зоной термического влияния из-за более длительного теплового воздействия.

При проектировании токопроводов динамическую устойчивость определяют исходя из пониженной прочности шин в результате отжига, либо располагают сварные швы в месте наименьшего изгибающего момента — на расстоянии 0,2—0,25 длины пролета между креплениями на изоляторе. Последнее решение усложняет раскрой шин и приводит к увеличению числа сварных швов.

При выполнении сварки шин следует руководствоваться Инструкцией по электродуговой сварке шин из меди, алюминия и его сплавов МСН-162—67 Минмонтажспецстроя СССР.

### **3. АКТИВНОЕ И ИНДУКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТОКОПРОВОДОВ**

Активным сопротивлением цепи называется отношение поглощаемой в цепи активной мощности к квадрату действующего значения электрического тока в этой цепи. Активное сопротивление проводника

при протекании постоянного тока равно его электрическому сопротивлению (в омах):

$$R_0 = \rho \frac{l}{S} [1 + \alpha (\theta_1 - \theta_0)], \quad (2)$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление проводника при температуре  $\theta_0$ , Ом·мм<sup>2</sup>/м;  $l$  — длина проводника, м;  $S$  — сечение проводника, мм<sup>2</sup>;  $\alpha$  — температурный коэффициент электрического сопротивления, для меди и алюминия равный 0,004;  $\theta_1$  — температура, при которой определяется сопротивление проводника, °C.

При переменном токе активное сопротивление  $R_{\sim}$  всегда больше омического вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости, а также вследствие потери энергии на гистерезис и вихревые токи в расположенных вблизи металлических элементах, т. е., как было установлено выше:

$$R_{\sim} = k_d R_0,$$

где  $k_d$  — суммарный коэффициент добавочных потерь, с учетом всех перечисленных выше причин.

Коэффициент добавочных потерь зависит от многих факторов, поэтому даже для вполне определенной конструкции токопровода он непостоянен и колеблется в некоторых пределах. При практических расчетах значение коэффициента добавочных потерь принимают по результатам экспериментальных исследований действующих токопроводов аналогичной конструкции либо лабораторных макетов. Но поскольку экспериментальных данных, точно соответствующих всем параметрам и условиям работы проектируемого токопровода, обычно нет, то пользуются приближенными значениями.

Для жесткого симметричного подвешенного токопровода, с подвесными изоляторами, с шинами корытного и трубчатого профилей, прокладываемого на открытом воздухе,  $k_d = 1,3 \div 1,5$ . При прокладке токопровода в галерее или туннеле, из-за наличия металлического ограждения и металла в строительной части сооружения коэффициент добавочных потерь возрастает на 0,2—0,3. Гибкий подвешенный симметричный токопровод имеет  $k_d = 1,05 \div 1,2$ .

и не оказывает существенного влияния на электродинамические усилия между фазами.

Токопровод с общим кожухом, разделенным на фазовые отсеки, по надежности, стоимости и прочим показателям занимает промежуточное положение между двумя рассмотренными конструкциями.

Обычно кожухи изготавливают из алюминия или алюминиевых сплавов. Стальные обладают малыми экранирующими свойствами и имеют дополнительные потери электроэнергии на гистерезис.

Шинный пакет вместе с охватывающим его кожухом представляет собой трансформатор без железа.

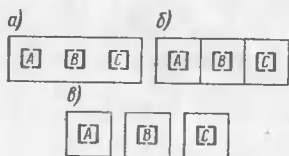


Рис. 23. Закрытые токопроводы: а — с неразделенными фазами; б — с разделенными фазами; в — с фазами в отдельных кожухах



Рис. 24. Схема заземления секций закрытого токопровода

При протекании тока по шинам в кожухах появляется индуктированный ток. Значение и характер этого тока зависят от диаметра и проводимости кожуха, а также от принятой схемы заземления кожухов.

По варианту заземления, принятому в отечественной практике, секции кожухов А, В, С по длине изолированы одна от другой и каждая заземлена в одной точке (рис. 24). В этом случае кожух каждой секции представляет собой короткозамкнутый виток, в котором при протекании тока по шинам возникают вихревые токи, создающие магнитный поток, направленный против потоков двух других фаз. Распределение этих потоков по длине и сечению кожуха неравномерно. Наибольшая концентрация наблюдается на концах секций. Результирующее магнитное поле внутри коробов слабое, что определяет ослабление электродинамических усилий между шинами сравнительно с усилиями, получаемыми при отсутствии экранов. Вместе с тем магнитное поле и взаимодей-

вие между кожухами разных фаз при этой схеме заземления велики. Как правило, взаимодействие между кожухами превышает усилие между незранированными фазами в 1,5—2,5 раза.

В закрытых токопроводах используют шинный пакет коробчатой формы из двух корытных профилей, пакет из двух профилей «полутруба», а также шины трубчатого сечения. При расположении закрытых токопроводов на открытом воздухе возможна конденсация влаги внутри кожуха. Для предотвращения пробоя на корпус использует ребристые изоляторы с относительно высоким разрядным напряжением. Сочленения секций уплотняют. Крепление шинного пакета в коробе в большинстве случаев осуществляют четырьмя изоляторами (рис. 25).

Для закрытых токопроводов с фазами в отдельных кожухах чаще всего употребляют кожухи круглой формы, которые проще в изготовлении и монтаже, легче и дешевле кожухов другой формы. Реже применяются кожухи квадратного сечения.

Помимо потерь в кожухах, наблюдаются некоторые потери в стальных частях, находящихся вблизи закрытого токопровода. Эти потери зависят от способа заземления кожухов и расположения стальных частей относительно токопровода. Полный коэффициент добавочных потерь токопровода с учетом неравномерности распределения тока по сечению шин, потерь в кожухах, а также в расположенных вблизи металлических частях равен примерно 2. Таким образом, по потерям закрытые токопроводы значительно уступают лучшим вариантам открытых токопроводов.

Индуктивное сопротивление токопроводов с фазами в отдельных кожухах примерно равно таковому при открытой прокладке тех же шин.

При токе до 10 000 А токопроводы выполняются с естественным отводом тепла. При больших токах

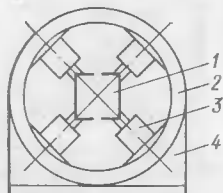


Рис. 25. Крепление шинного пакета закрытого токопровода  
1 — шинный пакет; 2 — кожух; 3 — изолятор; 4 — станина



обычно требуется принудительное воздушное охлаждение. В обоих случаях сечение токопроводов в металлических кожухах больше, чем у открыто проложенных.

Закрытые токопроводы значительно дороже открытых и поэтому, несмотря на их высокую надежность, менее распространены. В отечественной практике такие токопроводы применяются, в основном, для соединения генераторов с повышающими транс-

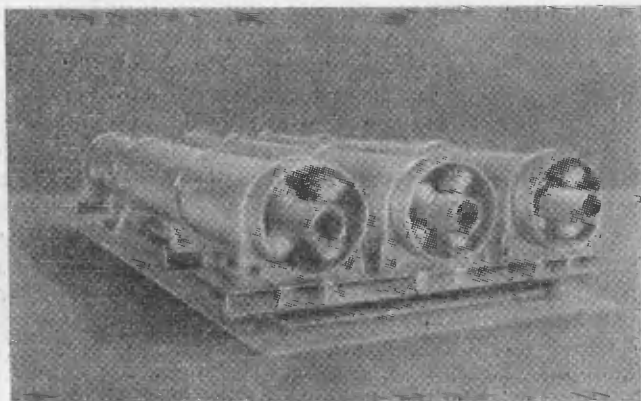


Рис. 26. Внешний вид блока прямого участка закрытого токопровода

форматорами и трансформаторами собственных нужд при блочной схеме.

Закрытые токопроводы для генераторов выпускаются в виде комплектных устройств, состоящих из блоков определенного назначения. На рис. 26 дан вид одного из блоков токопровода, предназначенного для турбогенераторов мощностью 200 МВт. Номинальный ток токопровода 9000 А, номинальное напряжение 15,75 кВ. В комплект входят встроенные трансформаторы тока и напряжения. Шины токопровода, алюминиевые трубчатой формы с наружным диаметром 280 мм и толщиной стенок 15 мм, выполняются путем сварки двух полутруб. Между полутрубками оставляют зазор 20 мм, служащий для циркуляции

воздуха. Каждая фаза токопровода заключена в отдельный цилиндрический кожух — экран диаметром 700 мм с толщиной стенки 5 мм.

В токопроводе применяются неподвижные кожухи и подвижные, служащие для соединения двух неподвижных. Подвижный кожух имеет несколько больший диаметр и может телескопически перемещаться по неподвижным кожухам на определенную длину. Для доступа к опорным изоляторам токопровода подвижные кожухи сдвигаются в сторону одного из неподвижных, образуя проем, необходимый для осмотра, ревизии и замены изоляторов.

Кожухи токопровода изолированы друг от друга резиновыми кольцами, служащими одновременно уплотнениями. Каждая секция токопровода соединяется с заземленной станиной только в одном месте. Для компенсации тепловых расширений шин, а также строительных неточностей в токопроводе устанавливаются гибкие шинные компенсаторы через каждые 6—12 м в зависимости от длины шин монтажных блоков. Соединение шин смежных блоков осуществляется аргоно-дуговой сваркой. Фазные кожухи закреплены на поперечных стальных балках. Для уменьшения потерь энергии от вихревых токов на балках установлены размагничивающие кольца из плоских алюминиевых шин. Токопроводы комплектуются из трехфазных блоков длиной до 7 м и массой до 4,5 т.

Для генераторов мощностью 300 МВт применяются закрытые комплектные токопроводы аналогичной конструкции на напряжение 20 кВ.

Отечественная промышленность изготавливает комплектный трехфазный токопровод типа ТКС-10 с общим кожухом для трех фаз на номинальные токи 2000 и 3200 А и номинальное напряжение 10 кВ. Токопровод с номинальным током 2000 А рассчитан на ударный ток КЗ 80 кА, а с номинальным током 3200 А — на ударный ток 125 кА. Схема связи трансформатора с распределительным устройством 10 кВ с помощью такого токопровода показана на рис. 27. Токопровод комплектуется из блоков различного назначения, и применяется для связи понижающего трансформатора с распределительным устройством

6—10 кВ, в том числе иногда на главных понижающих подстанциях предприятий.

**Кабель-токопровод.** При токах 1000—1500 А относительная (удельная) стоимость сооружения токопровода сильно возрастает. Для токопроводов, прокладываемых в закрытых галереях и туннелях, это происходит из-за того, что стоимость строительной части практически не зависит от мощности токопровода. Самонесущий токопровод с жесткими шинами на подвесных изоляторах не может быть применен в

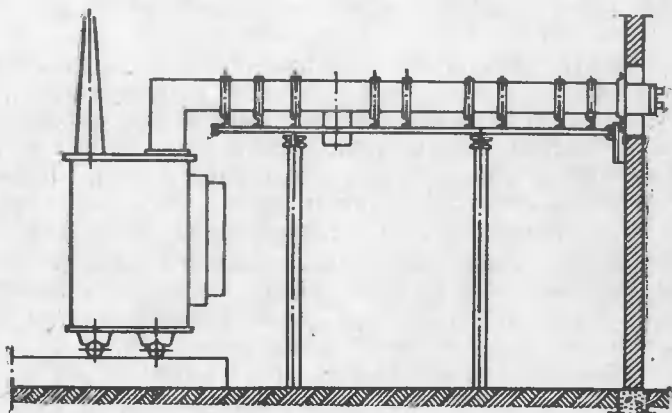


Рис. 27. Схема связи трансформатора с распределительным устройством 10 кВ с помощью закрытого токопровода с общим кожухом для трех фаз

этом случае из-за недостаточной прочности шин малого сечения. Применение шин большого сечения приводит к удорожанию токопровода из-за расхода цветного металла. Гибкий токопровод в ряде случаев неприменим из-за больших габаритов и недостаточной стойкости к химически активной среде. В связи с этим в последние годы наряду с токопроводами описанных конструкций стал применяться так называемый кабель-токопровод, выполняемый на основе однофазных кабелей большого сечения, выпуск которых освоен отечественной промышленностью. Кабель-токопровод состоит из трех одножильных кабелей, скрепленных специальными скобами в симметричный трехфазный пакет. В кабелях-токопроводах

используются кабели марки АВЭВ сечением 1000 и 15 000 мм<sup>2</sup>. Такие кабели изготавливаются (но пока еще в малых количествах) на напряжения 6 и 10 кВ. Способы прокладки кабеля-токопровода и строительные конструкции, которые при этом используются, такие же, как и для кабелей.

## 7. ЗАЩИТА И ЗАЗЕМЛЕНИЕ

**Релейная защита и автоматика.** Токопроводы 6—10 кВ обычно отходят от шин мощных понижающих подстанций либо от шин генераторного напряжения электростанций. КЗ на головном участке токопровода сопровождается появлением таких же токов и таким же снижением напряжения, как и КЗ на шинах, к которым присоединен токопровод.

Для сохранения устойчивости работы электростанции в системе и для предотвращения длительного значительного снижения напряжения нередко требуется весьма быстрое отключение КЗ. Так, например, защита всех элементов сети, КЗ в которых вызывает снижение напряжения на шинах электростанции ниже 0,6 номинального, должна быть выполнена без выдержки времени. Для токопроводов, отходящих от шин понижающих подстанций, допустима некоторая выдержка времени (по согласованию с энергосистемой), однако желательно, чтобы ее не было: это повысит возможность быстрого восстановления нормальной работы с помощью автоматического ввода резерва (АВР) с самозапуском электродвигателей.

Релейная защита токопровода зависит от схемы, в которой он применен. Наиболее характерной для промышленных предприятий является схема, представленная на рис. 3. В некоторых случаях выключатели на ответвлениях от токопровода устанавливают не до реакторов, а за реакторами.

Релейная защита токопроводов должна быстро реагировать на все виды междуфазных КЗ в токопроводах до выключателей ответвлений к РП и

с соответствующей выдержкой времени — при КЗ на шинах и отходящих линиях РП. Недопустимо, чтобы токопроводы отключались защитой в режиме автоматического переключения всей нагрузки на одну цепь двухцепного токопровода, которое сопровождается самозапуском электродвигателей, так как это приведет к остановке производства и большому экономическому ущербу.

На токопроводах предусматривается два вида защиты: основной мгновенного действия и резервный, как правило, с выдержкой времени.

Основная защита должна обеспечивать отключение токопровода без выдержки времени при междофазных КЗ на токопроводе до выключателей на ответвлениях. В качестве основной защиты применяются: мгновенная токовая отсечка, полная продольная дифференциальная токовая защита, а также дистанционная защита.

Токовая отсечка применима в том случае, если она надежно может отключить токопровод при двухфазном КЗ в наиболее удаленной точке токопровода и не отключает токопровод при трехфазном КЗ за реактором ближайшего к источнику питания ответвления. При этом в первом случае расчет ведется в минимальном режиме энергосистемы, когда токи КЗ минимальны, а во втором случае — в режиме максимально возможных токов КЗ.

Токопроводы обладают значительной индуктивностью и при значительной их длине ток КЗ в конце токопровода в несколько раз меньше тока КЗ в начале токопровода и может даже быть меньше чем за ближайшим к началу токопровода реактором. В этом случае максимальная токовая отсечка непригодна и приходится применять более сложные защиты, например дифференциальную. Продольная дифференциальная токовая защита требует для своего осуществления прокладки соединительных кабелей между трансформаторами тока, установленными в начале токопровода и на всех ответвлениях от него. Когда сумма токов ответвлений равна току в начале токопровода, через токовые реле дифференциальной защиты (включенные на разность этих токов) протекает лишь небольшой ток небаланса, когда же в пределах

токопровода возникает КЗ, баланс токов полностью нарушается и дифференциальная защита без выдержки времени отключает токопровод.

Резервная защита, устанавливаемая в начале токопровода, должна обеспечить резервирование основной защиты токопровода и резервирование защит, установленных на ответвлениях от него. Резервная защита должна быть чувствительна к минимальным токам КЗ за реакторами на ответвлениях, но не должна срабатывать при любых возможных рабочих токах. В качестве резервной защиты применяют максимальную токовую защиту с выдержкой времени, отстроенную от защит отходящих линий РП. Если по условиям сети резервная защита токопровода не может быть выполнена с выдержкой времени, например в случае, когда напряжение на шинах электростанции при КЗ может снизиться ниже 60% номинального, вместо максимальной токовой защиты с выдержкой времени приходится применять более сложную защиту.

Однофазные замыкания на землю в токопроводах 6—10 кВ в сетях с малым током замыкания на землю не требуют быстрого отключения токопровода. Замыкания обнаруживаются прибором для контроля изоляции, предусматриваемом в распределительном устройстве, к которому присоединен токопровод.

Подстанции обычно получают питание по двум отдельно работающим цепям токопровода, каждая из которых подключена к одной из секций или к одной из систем шин. Для повышения надежности электроснабжения потребителей на секционном выключателе распределительных подстанций устраивается АВР, действующий при исчезновении напряжения на одной из цепей токопровода и наличии его на другой. АВР отключает со стороны подстанции цепь, на которой пропало напряжение и, включая секционный выключатель, подает напряжение на обесточенную секцию шин от второй цепи. Если отключение первой цепи токопровода произошло в результате КЗ на питаемой этой цепью секции РП и если это КЗ устойчиво, включение секционного выключателя при АВР может вызвать отключение второй цепи. Для предотвращения этого на секционном выключателе предусматривается защита от КЗ, которая

работает без выдержки времени и действует только на время включения АВР, а затем выводится.

Для того чтобы не произошло ложного отключения токопровода устройством АВР при значительных снижениях напряжения в нем во время КЗ в сети вне токопровода, время действия АВР обычно отстраивается от времени действия релейной защиты в сети. В ряде случаев для самозапуска электродвигателей необходимо обеспечить минимальное время действия АВР. Ускорить действие АВР можно введением в его пусковой орган токовой блокировки.

При токовой блокировке время действия АВР не зависит от времени работы релейной защиты, отключающей КЗ, и может быть доведено до времени, необходимого для переключения коммутационных аппаратов.

Время действия АВР может увеличиться также из-за наличия в сети синхронных электродвигателей, которые после отключения питания подстанции временно поддерживают на ее шинах напряжение. Чтобы предотвратить увеличение времени действия АВР при наличии синхронных двигателей в пусковой орган вводят реле пониженной частоты, которое через 0,05—0,08 с позволяет фиксировать прекращение питания со стороны системы, даже если оно и не сопровождается понижением напряжения на шинах.

При питании потребителя по одной цепи токопровода для повышения надежности электроснабжения было бы целесообразно предусматривать автоматическое повторное включение (АПВ) цепи токопровода после ее отключения. Однако выпускаемые в настоящее время выключатели, которые устанавливаются на токопроводах со стороны источника питания, непригодны для работы в цикле АПВ.

**Защита от атмосферных перенапряжений.** Открытые токопроводы могут присоединяться непосредственно к шинам генераторного напряжения электростанций при мощности генераторов до 120 МВт включительно, при условии защиты последних от атмосферных перенапряжений со стороны токопроводов.

В защите от атмосферных перенапряжений нуждаются также электродвигатели и синхронные ком-

пенсаторы, подключенные к токопроводам без промежуточных трансформаторов.

От ударов молнии защита токопроводов выполняется либо отдельно стоящими стержневыми молниеотводами, либо тросами, подвешенными на самостоятельных опорах, расположенных вдоль трассы токопровода по обе его стороны. Отдельно стоящие молниеотводы располагаются по обе стороны от токопровода в шахматном порядке. Расстояние от крайней фазы токопровода до молниеотвода или до опор, на которых подвешивается защитный трос, должно быть не менее 5 м. Сопротивление заземляющего устройства каждого тросового или стоящего отдельно молниеотвода не должно превышать 10 Ом. Высота молниеотводов и расстояние между ними определяется специальным расчетом.

Крепить защитный трос к опорам, на которых подвешен токопровод, недопустимо, так как ток молнии в этом случае может легко перейти на шины. Условия перехода тока молнии на шины токопровода, проложенного в закрытой галерее с металлическим или железобетонным каркасом, по существу такие же, как и у открыто проложенных токопроводов. Поэтому для таких токопроводов выполняют защиту от ударов молнии так же, как и для открытых токопроводов. Участки токопроводов, проходящие вблизи высоких зданий и сооружений и расположенные в зоне их защиты, в дополнительной защите от ударов молнии не нуждаются.

Для защиты от индуктированных перенапряжений генераторов ТЭЦ, к РУ генераторного напряжения которых подключены токопроводы промышленных предприятий, на шинах ТЭЦ должны быть установлены вентильные разрядники типа РВМ и защитные конденсаторы, емкость которых выбирается в зависимости от длины токопровода по таблице, приведенной в ПУЭ.

На вводах подстанций или РП, получающих питание по токопроводам и имеющих присоединенные высоковольтные электродвигатели, должны быть установлены вентильные разрядники для вращающихся машин и защитные емкости: при двигателях



мощностью более 3000 кВт — 0,6 мкФ, а при двигателях меньшей мощности — 0,5 мкФ на фазу.

**Заземление.** У открытых токопроводов 6—10 кВ, прокладываемых в закрытых галереях и туннелях, заземлению подлежат металлические конструкции, к которым крепятся опорные или подвесные изоляторы, трехлучевое звено распорок из подвесных изоляторов, ограждения, а также ножи стационарных закороток. Все эти элементы присоединяются к магистрали заземления, прокладываемой вдоль токопровода. Магистраль заземления присоединяется к заземляющим устройствам всех подстанций, связанных токопроводом.

У открытых токопроводов, прокладываемых вне зданий на металлических или железобетонных опорах на высоте, не требующей ограждения, должны заземляться опоры. Для гибких токопроводов заземление опор выполняется аналогично заземлению опор воздушных линий электропередачи. Заземление опор токопроводов с жесткими шинами осуществляется двумя способами: либо так же, как заземление опор гибких токопроводов и ЛЭП, либо присоединением к заземляющей магистрали. В качестве такой магистрали для токопроводов с подвесными изоляторами используют алюминиевый провод сечением 35 мм<sup>2</sup>, закрепленный на опорах токопровода и присоединенный к заземляющим устройствам подстанций. Наличие вдоль трассы токопровода заземляющей магистрали дает возможность заземлять не только опоры и находящиеся на них конструкции для крепления изоляторов, но также трехлучевые звенья изоляционных распорок в пролете между опорами. Благодаря этому устройство для контроля изоляции может обнаружить пробой одного из изоляторов в распорке до возникновения КЗ.

В токопроводе с опорными изоляторами в качестве магистрали заземления используют металлические продольные балки (или арматуру железобетонных балок), к которым крепятся подвески токопровода. При выполнении монтажных или ремонтных работ на отключенной цепи токопровода вблизи другой работающей цепи и при возникновении на последней КЗ на отключенном токопроводе может быть наведено

опасное для жизни напряжение. Для предотвращения этого на отключенном токопроводе устанавливают заземляющие закоротки.

В соответствии с ПУЭ число мест для установки закороток или заземляющих разъединителей следует выбирать с таким расчетом, чтобы наведенное от соседней цепи при КЗ линейное напряжение не превышало 250 В. Закоротки обязательны в начале и конце токопровода, в местах транспозиций, а также в непосредственной близости от места работы людей. Наличие закороток на концах токопровода обеспечивает условия безопасности даже при случайной подаче напряжения на ремонтируемый токопровод. Следует иметь в виду, что и при наличии закороток работы на токопроводе во время грозы недопустимы.

## **8. МОНТАЖ ТОКОПРОВОДОВ**

Производительность труда и стоимость работ при монтаже токопровода в значительной степени зависят от организации и технологии выполнения работ.

Для токопроводов с жесткими шинами целесообразно максимально возможный объем работ выполнять в мастерских электромонтажных заготовок (МЭЗ) и свести к минимуму работы в монтажной зоне. В основном это подъем, установка и соединение заранее изготовленных секций, а также работы по заземлению. Выполнение большей части работ в МЭЗ позволяет лучше использовать имеющуюся у монтажных организаций технику и обеспечить лучшие условия труда.

На степень механизации электромонтажных работ значительное влияние оказывает также конструкция применяемого токопровода. Так, токопроводы с жесткими шинами обеспечивают большую механизацию работ, чем гибкие токопроводы.

До начала изготовления и монтажа токопровода обычно выполняется проект производства работ (ППР). В ППР необходимо отразить следующие вопросы: раскрой токопровода на укрупненные

монтажные секции; технологию заготовки и сборки укрупненных секций; технологию выполнения заготовок угловых поворотов шин; план монтажно-заготовительного полигона с размещенными станками и механизмами; чертежи нестандартного оборудования и приспособлений, изготавливаемых в МЭЗ; перечень и техническую характеристику подъемно-транспортных средств.

Кроме того, в ППР должны быть отражены трудовые затраты, графики работ, состав бригад, а также особенности выполнения монтажа на отдельных сложных участках. Монтаж токопровода ведется по рабочим чертежам, выполненным проектной организацией, и по проекту производства работ.

В проектах токопроводов с жесткими шинами обычно предусматривается применение типовых секций длиной 6—7 м. Такая длина принимается проектировщиками, исходя из наиболее стесненных условий монтажа, например в туннеле или галерее, куда занести более длинные секции затруднительно.

Если токопроводы с жесткими шинами прокладываются открыто, то, как правило, имеется возможность выполнять монтаж из секций значительно большей длины. Максимальная длина укрупненной секции определяется исходя из наличных подъемно-транспортных средств, а также состояния и проходимости дорог, по которым готовые секции будут доставляться на трассу токопровода. Длина укрупненных секций на прямолинейных участках трассы обычно принимается не более 36 м, а на поворотах — не более 24 м.

Угловые секции рекомендуется выполнять так, чтобы длина шин после поворота не превышала 2 м. Большая длина из-за неточности изготовления и из-за строительных допусков при установке опор может привести к заметному расхождению концов шин в стыке секций.

При прокладке токопровода в галерее или туннеле монтаж ведется либо одиночными, либо сдвоенными типовыми секциями длиной не более 14 м.

На рис. 28 показана схема участка трассы токопровода, разбитого на укрупненные секции. Цифрами

в кружках обозначены номера опор токопровода, а римскими цифрами — номера укрупненных секций.

Температурные компенсаторы при раскрое целесообразно располагать на стыках укрупненных секций. Такое решение облегчает соединение секций при монтаже, а для токопроводов на опорных изоляторах обеспечивает жесткость секции, освобождая от необходимости применения при транспортировке специальных временных креплений. Температурные ком-

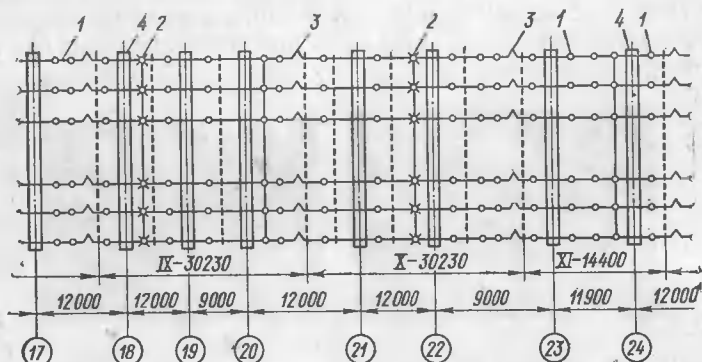


Рис. 28. Схема участка трассы токопровода с размещением укрупненных секций между опорами № 17 и 24

1 — мягкое крепление шин; 2 — глухое крепление шин; 3 — температурный компенсатор; 4 — фиксатор

пенсаторы устанавливаются не реже чем через 30—40 м на прямолинейных участках, а также на расстоянии 1—2 м от угла поворота. Компенсаторы симметричных подвесных самонесущих токопроводов обычно располагают на специальной опоре, имеющей две траверсы и распорки по обе стороны компенсатора.

Раскрой токопровода следует производить таким образом, чтобы избежать применения вставок между укрупненными секциями. Поэтому секцию, которая устанавливается последней, следует выполнять по замеру, что позволит учесть имеющиеся неточности при выполнении строительной части и при стыковке предыдущих секций.

Заготовку укрупненных секций рационально выполнять на специально оборудованном для этих целей полигоне. Полигон может быть создан либо на территории МЭЗ, либо вблизи трассы токопровода. Последний вариант применяется при неудовлетворительном состоянии дорог, связывающих МЭЗ с трассой. Размеры полигона зависят от протяженности сооружаемого токопровода, а также от примененного профиля шин. При коробчатых шинах, свариваемых из двух корытных профилей, размеры полигона должны быть большими, так как в этом случае необходимы дополнительные операции рихтовки шин и сварки

а)



б)

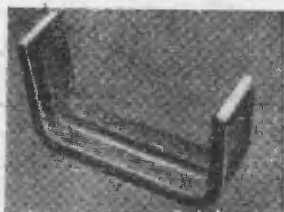


Рис. 29. Расположение шин на сварочном столе: а — стык шин, охваченный формирующей скобой; б — стальная формирующая скоба с канавкой

их в короб. При профилях «двойное Т» и «труба круглая» эти операции отсутствуют. Размеры заготовительно-сборочного полигона определяются при разработке ППР.

Наиболее трудоемкими элементами токопровода являются шинные секции, поддерживающие конструкции и температурные компенсаторы.

По энергетическим показателям и технологичности монтажа наилучшим профилем шин является «труба круглая». Профиль «двойное Т» также удобен для изготовления и монтажа токопровода, но при том же сечении имеет большие потери энергии, чем профиль «труба круглая». Коробчатые шины, собранные из двух корытных профилей, наиболее трудоемки в изготовлении.

Поступившие с завода-изготовителя шины расконсервируются от жирового слоя смоченной в бензине

или ацетоне тряпкой. Неровные концы обрезают на дисковой пиле. После этого из заготовок сваривают плети по длине укрупненной секции. При корытных шинах необходима их рихтовка, которая производится ударами деревянной киянки или кувалды через алюминиевую подкладку. После рихтовки и обрезки концов заготовки корытных шин укладывают на сварочный стол (рис. 29) так, чтобы стык шин оказался

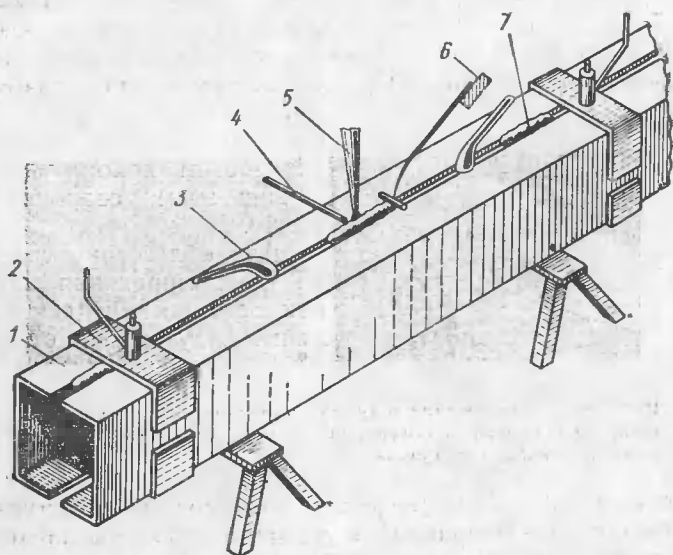


Рис. 30. Сварка перемычек

1—короб из двух корытных профилей; 2—стягивающая скоба; 3—поворотный фиксатор зазора; 4—присадка; 5—электрод; 6—формирующая лопатка; 7—соединительная перемычка

охваченным формирующей скобой. Шины должны входить в скобу туго после нескольких ударов кувалдой. Сварка стыка производится по внутренней поверхности профиля. Таким образом из корытного профиля изготавливается плеть по длине укрупненной секции. Из готовых плетей при помощи соединительных перемычек свариваются шинные короба (рис. 30).

Зазор между полками шин устанавливают с помощью поворотных фиксаторов, имеющих на конце

овальный выступ. Вначале фиксаторы с обеих сторон перемычки устанавливают на большой зазор по наибольшему диаметру овала. Сразу после окончания сварки фиксаторы поворотом на  $90^\circ$  переводят на меньший зазор, при котором и происходит остывание шва. Благодаря этому предотвращается возникновение трещин в шве при усадке металла.

Сварка перемычек производится с помощью специального приспособления — формирующей лопатки.

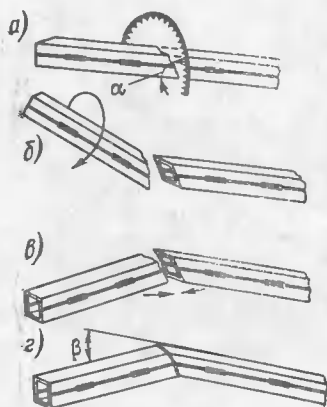


Рис. 31. Операции при выполнении углового поворота шины

Лопатка заводится в щель, затем поворачивается и благодаря противовесу прижимается своей плоскостью к внутренним поверхностям полков, удерживая этим сварочную ванну.

Для облегчения сварки и формирования шва при соединении секций шин между собой с одного конца секции обычно заранее привариваются специальные формирующие планки.

При выполнении поворотных секций наиболее рационально раскрой шин

выполнять следующим образом: если угол поворота шин равен  $\beta$ , то угол реза шин  $\alpha$  должен быть равен  $(180 - \beta) : 2$ . После разрезки шин правый отрезок разворачивается вокруг своей оси на  $180^\circ$  и сваривается с левым, образуя нужный угол поворота. Эти операции показаны последовательно на рис. 31. Разрезание шин под любым углом поворота может быть выполнено на циркульной пиле, снабженной дополнительным делительным устройством (линейкой с делениями в градусах). Пила должна быть также снабжена зажимами, фиксирующими шину в нужном положении.

Сварку шин токопровода из алюминия и алюминиевых сплавов АД31Т и АД31Т-1 рекомендуется производить в среде инертного газа — аргона. Только этот вид сварки обеспечивает хорошее качество шва

и стойкость его к воздействию атмосферы. При аргоно-дуговой сварке возможно варить не только нижним швом, но также вертикальным и горизонтальным, а при использовании импульсного генератора — потолочным швом.

Если токопровод предназначен для работы в условиях химически активной среды, то шины по всей поверхности должны быть покрыты защитной пленкой. В качестве покрытия может быть применена эмаль марки ХСЭ по ГОСТ 7413—55, наносимая в два — три слоя по грунту марки ВЛ-02 по ТУ 35Х-П-432 или

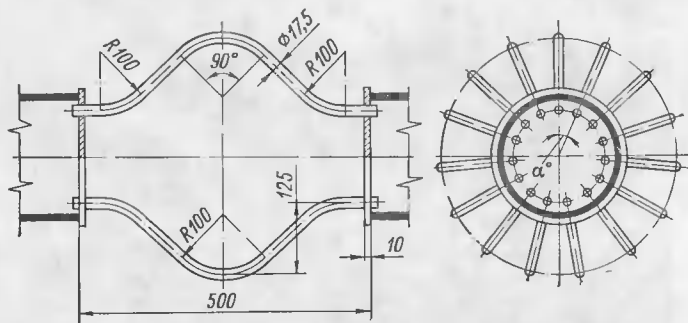


Рис. 32. Температурный компенсатор из гибких многопроволочных алюминиевых проводов

грунту марки ВЛ-08 по ВТУ УХП-107-59 с растворителем марки Р-4. Стальные конструкции токопровода покрывают эмалью марки ХСЭ, по слою грунта марки ХС-010. Шинодержатели должны иметь защитное покрытие цинком или кадмием, либо подвергнуть-ся воронению.

В настоящее время, как правило, применяются такие токопроводы с жесткими шинами, у которых шины расположены симметрично — по углам равно-стороннего токопровода. Для этих токопроводов поте-ри мощности в поддерживающих конструкциях, даже если они из стали, невелики и поэтому алюминиевые сплавы для поддерживающих конструкций не приме-няются. Изготовление стальных поддерживающих конструкций специфических особенностей не имеет.

Температурные компенсаторы для токопроводов выполняются из алюминиевых лент толщиной 1 мм



либо из гибких алюминиевых проводов (рис. 32). Компенсаторы на большие токи комплектуют обычно из нескольких компенсаторов типа КШ 120/10 с алюминиевыми лентами шириной 120 мм. Компенсаторы этого типа хорошо работают на сжатие, происходящее при удлинении шин, но имеют малый запас при растяжении — всего около 3 см. Для предотвращения разрыва компенсатора при низких температу-

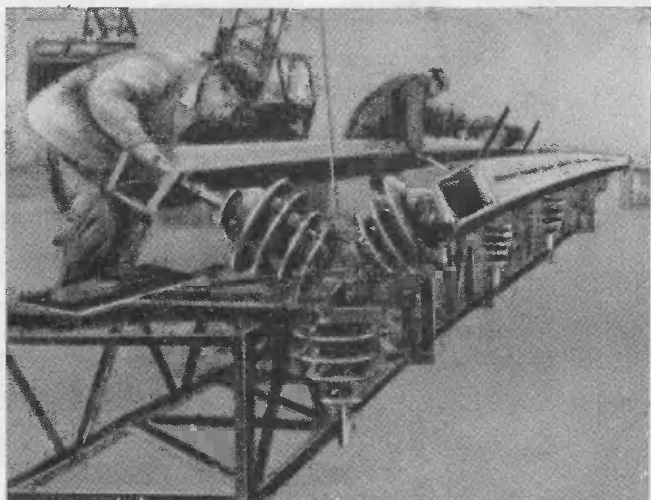


Рис. 33. Установка шин на изоляторы при сборке секции симметричного токопровода

рах расстояние между компенсаторами должно быть выбрано исходя из максимально возможного перепада температуры и соответствующего ему изменения длины шин. Максимальное расстояние между компенсаторами этого типа при алюминиевых шинах не должно превышать (в см)

$$h = 3 : (1,1 \cdot 24 \cdot 10^{-6} t_{\text{макс}}),$$

где  $24 \cdot 10^{-6}$  — коэффициент линейного расширения алюминия; 1,1 — коэффициент запаса по длине;  $t_{\text{макс}}$  — перепад между температурой, при которой производится монтаж и минимально возможной темпе-

ратурой района. Нетрудно убедиться, например, что если  $t_{\text{макс}} = 50^\circ\text{C}$ , то расстояние между компенсаторами не должно превышать 22,7 м.

Компенсаторы из гибких голых алюминиевых проводов позволяют компенсировать большие изменения длины шин и могут устанавливаться реже. В изготовлении эти компенсаторы сложнее.

Трехфазная секция симметричного подвесного токопровода с жесткими шинами и опорными изолято-

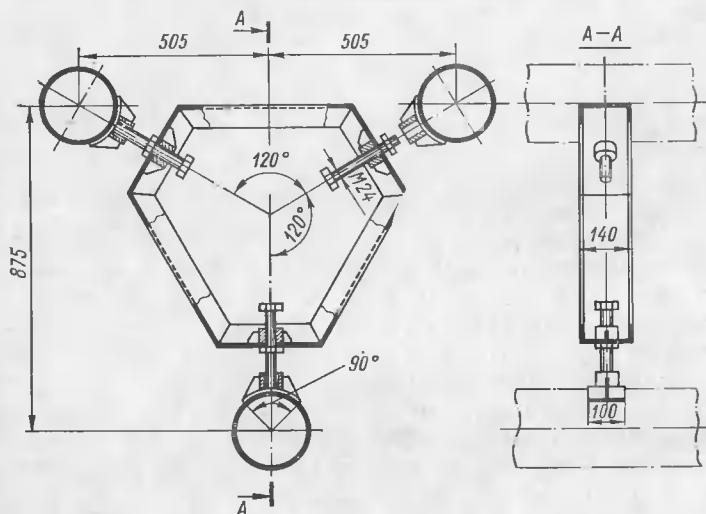


Рис. 34. Временное крепление шин симметричного подвесного токопровода с подвесными изоляторами.

рами представляет собой жесткую конструкцию. Сборка такой секции длиной более 12 м производится на монтажно-транспортной раме. Вначале на эту раму по шнуру устанавливают и крепят опорные конструкции с изоляторами (рис. 33), а затем заготовленные шины монтажным краном устанавливают на изоляторы и крепят к ним шинодержателями. В середине секции применяют жесткое крепление шин к изоляторам, а в остальных местах — свободное крепление, не препятствующее продольному перемещению шин при изменении их длины из-за температурных колебаний. Окончательно собранную

секцию маркируют — на ее ближайшем к началу токопровода конце пишут номер секции и букву Н (начало). Например, X — Н.

Сборка укрупненных секций симметричного подвесного самонесущего токопровода с подвесными изоляторами ведется аналогичным образом, но, так как такая секция при подвесных изоляторах не обладает необходимой жесткостью, применяют специальные временные крепления шин (рис. 34), которые обеспечивают жесткость и правильное геометрическое расположение шин при монтаже, транспортировке и подъеме секций на опоры. Эти крепления устанавливают на монтажно-транспортной раме, затем крепят к ним шины, а уже затем устанавливают распорки и подвески с изоляторами. Секции длиной 12 м и меньше можно монтировать и перевозить без специальной монтажно-транспортной рамы.

Транспортировка длинномерных секций производится автомашиной марки ЗИЛ-151 (или ей подобной) с двухосным прицепом. Буксировка осуществляется на жесткой связи (труба). Погрузка секции, смонтированной на транспортной раме, на автопоезд производится автокраном. Перевозка длинномерных секций может быть осуществлена также с помощью трейлера-опоровоза, применяемого на строительстве линий электропередачи. Транспортировке длинномерных секций на трассу токопровода должен предшествовать осмотр дорог, а в случае необходимости, ремонт последних и увеличение радиусов закругления на поворотах. Минимальные радиусы закругления дорог в зависимости от расстояния между задней осью тягача и осью прицепа (базы автопоезда) приведены в табл. 4.

Таблица 4

База автопоезда, м	Минимальный радиус закругления дороги, м
20	16
24	21
28	28
32	33
46	40

Для монтажа симметричного токопровода с жесткими шинами необходимо следующее оборудование:

Кран монтажный на гусеничном ходу грузоподъемностью 16—20 т со стре- лой длиной 18—20 м . . . . .	2
Траверса подъемная с тросом и стропа- ми, длиной 25 м . . . . .	1
Гидроподъемник на автомашине (АГП-12) . . . . .	2
Электролебедка грузоподъемностью 5 т	2
Полиспаст грузоподъемностью 4—5 т . .	4
Полуавтомат аргоно-дуговой свароч- ный с плавящимся электродом (ПРМ-12) . . . . .	2
Выпрямители на 600 А, 30—40 В . . .	2
Пик-генератор типа ИИП-1 с регули- ровкой . . . . .	2
Щиток, электродержатель, формирую- щие приспособления . . . . .	2 комплекта

При подъеме секции с помощью транспортной рамы применяется следующая последовательность операций: строповка за раму, подъем на опоры, подвеска секции к траверсам опор или к прогонам (при токопроводах с опорными изоляторами). После спуска транспортной рамы на землю производят регулировку высоты подвески и зазоров между секциями. Затем выполняют сварку секции.

Монтаж секций токопровода, имеющего повороты, целесообразно вести начиная с угловой секции, а затем монтировать прямые секции. Устанавливаемая последней секция должна быть изготовлена исходя из размеров оставшегося просвета в пролете.

Монтаж гибких токопроводов коренным образом отличается от монтажа токопроводов с жесткими шинами и во многом аналогичен сооружению воздушных линий электропередачи с расщепленными проводами. Если при токопроводах с жесткими шинами основные работы выполняются в МЭЗ или на заготовительном полигоне, то при гибких токопроводах основные работы приходится выполнять непосредственно на трассе токопровода. Монтаж токопровода производится в соответствии с Инструктивными указаниями по монтажу гибких токопроводов, разработанными Куйбышевским отделением ВНИПИ Проектэлектромонтаж.

После установки опор производится раскатка проводов. Раскатка может производиться при помощи кабелеукладчика; спецмашины с установленными на ней барабанами; лебедок или тракторов с барабанами, установленных на домкратах. Раскатка проводов при помощи кабелеукладчика или специальной машины возможна, если трасса токопровода не пересекается надземными сооружениями. При раскатке тракторами создаются рывки, могущие вызвать недопустимые напряжения в проводах, поэтому раскатку тракторами нужно вести с большой осторожностью. Раскатка проводов при помощи лебедок применима независимо от наличия сооружений, пересекающих трассу, и практически не сопровождается резкими рывками. Основным недостатком этого способа раскатки является низкая производительность труда. При раскатке проводов при помощи тракторов и лебедок должны быть предусмотрены мероприятия, исключающие волочение проводов по земле.

Подъем проводов на опоры и вытяжка проводов может производиться несколькими способами. При первом способе сначала при помощи сцепной арматуры к опорам подвешивают контрольный трос и производят его вытяжку. При этом размечают места подвеса. Затем трос опускают. Потом производят раскатку проводов, их вытяжку, опрессование в зажимах и сборку фаз. Затем целиком смонтированные фазы поднимают на опоры.

При втором способе работы ведутся в следующей последовательности: производят раскатку двух контрольных проводов и их опрессование в натяжных зажимах с одной стороны, установку балансирных роликов и блоков на промежуточных опорах, подъем и вытяжку двух контрольных проводов, опускание контрольных проводов и их опрессование с другой стороны, вытяжку последующих проводов (без подъема на опоры), сварку фаз и подъем их на опоры.

При третьем способе на анкерных опорах на высоте 3—5 м монтируют временные траверсы, а у промежуточных опор устанавливают козлы с конструкциями под балансирные ролики. Используя времен-

ные траверсы и козлы, производят поочередную вытяжку проводов и сборку фаз. Затем одновременно на двух — трех опорах производят подъем фазы.

При четвертом способе на всех промежуточных опорах устанавливают временные траверсы для подвески конструкций с балансирными роликами и блоками. Порядок работ следующий: производят раскатку проводов и опрессовку их с одной стороны, затем подъем нескольких проводов (до пяти), укладку их в балансирные ролики и вытяжку, затем опускание проводов, опрессование их с другой стороны, подъем и укладку в постоянные зажимы. После этого аналогичным образом производят подъем, вытяжку и перекладку в постоянные зажимы остальных проводов фазы.

Все перечисленные способы подъема и вытяжки проводов имеют как преимущества, так и недостатки. Первый способ не требует установки специальных временных траверс, а также подъема и вытяжки проводов для определения мест установки натяжных зажимов, но вместе с тем не обладает большой точностью из-за неодинакового провеса троса и проводов. Требуется также корректировка при угловых опорах из-за разной длины проводов в фазе. Способ может быть рекомендован при небольших пролетах — до 150 м. Второй способ обеспечивает большую точность, чем первый, но при пролетах более 250—300 м точность также недостаточна. Недостатком способа является и необходимость спуска проводов с опор после вытяжки для опрессования зажимов. Преимущество третьего способа — возможность выполнения всех работ по вытяжке и сборке фаз на земле. Недостатком является необходимость дополнительных временных траверс. При наличии препятствий, пересекающих трассу, применение этого способа затруднительно. При четвертом способе также требуется установка временных траверс. Преимуществом способа является упрощение подъема проводов и достаточная точность регулирования стрел провеса.

Внутрифазовая транспозиция осуществляется путем расположения проводов по пологой спирали за счет смещения проводов на один зажим в поддерживающем

устройстве на каждой опоре при монтаже. Для этого после окончания работ по вытяжке и креплению проводов к опорам на проектных отметках провода поворачивают вокруг продольной оси фазы токопровода. Концевое крепление проводов с одной стороны пролета должно в связи с этим иметь возможность свободного вращения вокруг продольной оси.

## **9. ПРИЕМО-СДАТОЧНЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТОКОПРОВОДОВ**

Перед вводом в эксплуатацию токопроводы должны быть подвергнуты приемо-сдаточным испытаниям.

Опорные и проходные изоляторы внутренней и наружной установок проверяются повышенным напряжением. Испытательное напряжение промышленной частоты для одноэлементных опорных проходных изоляторов на 6 кВ равно 32 кВ, а для изоляторов на 10 кВ — 42 кВ.

Измеряется также сопротивление изоляции подвесных многоэлементных опорных изоляторов. Измерение производится мегомметром на 2500 В и должно быть не менее 300 МОм для каждого подвесного изолятора и каждого элемента штыревого изолятора. Электрические испытания стеклянных подвесных изоляторов не производятся. Контроль состояния их выполняется путем внешнего осмотра.

Производится выборочная проверка (до 5% общего числа болтовых и сварных контактов шин токопровода. Сопротивление участка шины в месте контактного соединения должна не более чем в 1,2 раза превышать сопротивление участка шины той же длины без контактов.

В объем приемо-сдаточных испытаний входит проверка состояния заземляющего устройства токопровода, предусматривающая выборочный осмотр элементов; проверку наличия цепи между заземлителями и заземляемыми элементами; измерение со-

противления заземляющего устройства, значение которого должно соответствовать проекту и ПУЭ.

В некоторых случаях для определения энергетических показателей токопровода проводят испытания по расширенной программе, включающей измерение потерь мощности и напряжения, замер напряжения, наведенного в отключенном токопроводе от проложенного параллельно работающего токопровода, а также определение температуры отдельных элементов токопровода. Измерение потерь мощности ведется в режиме искусственного КЗ при пониженном напряжении. В качестве источника тока используется обособленный генератор либо автотрансформатор с регулируемым напряжением. Замеры производятся при токах, равных 25, 50, 75 и 100% номинального тока токопровода.

Наведенное напряжение на неработающем токопроводе измеряется при наложении закороток, предусмотренных проектом. Измерения ведут на середине пролета между закоротками. Переносным вольтметром поочередно замеряют напряжение между разными фазами и между фазами и землей. В случае возникновения КЗ на работающем токопроводе напряжения в неработающем токопроводе возрастут во столько раз по сравнению с замеренным, во сколько ток КЗ превысит ток в режиме испытания.

Правила технической эксплуатации электроустановок (ПТЭ) не имеют отдельного раздела, посвященного токопроводам. Поэтому для токопроводов используются разделы: для гибких токопроводов — раздел ПТЭ по линиям электропередачи, а для токопроводов с жесткими шинами — раздел, посвященный ошиновкам распределительных устройств. Токопровод может быть принят в эксплуатацию после окончания всех работ по монтажу и проведения приемо-сдаточных испытаний.

При сдаче в эксплуатацию сдающей организацией должны быть предъявлены: проект, по которому сооружался токопровод; перечень отступлений от проекта с исполнительными исправленными чертежами; протоколы приемо-сдаточных испытаний; акты на скрытые работы по фундаментам и заземляющим устройствам.



Работы, связанные с эксплуатацией токопроводов, в основном заключаются в визуальном осмотре токопроводов с целью обнаружения неисправностей, в периодической чистке изоляторов и проверке заземления. Для токопроводов, расположенных в надземных галереях, дополнительными работами являются поддержание в надлежащем порядке строительной части и работы по предотвращению попадания в место размещения токопровода воды.

Правильный выбор изоляции токопроводов обеспечивает их надежную работу. Территория предприятий некоторых отраслей промышленности, в частности химических, цементных, глиноземных и алюминиевых заводов, характеризуется загрязненной атмосферой. На таких предприятиях должны применяться токопроводы с повышенной изоляцией. Для токопроводов 10 кВ, прокладываемых на открытом воздухе, используются опорные изоляторы на 35 кВ и подвесные грязестойкие изоляторы с одним или двумя изоляторами на фазу.

Однако при особо тяжелых условиях даже такое решение не может обеспечить хорошего состояния изоляции в течение длительного времени. Постепенно поверхность изоляторов покрывается налетом, который в некоторых случаях цементируется, и изоляция может понизиться до недопустимого уровня. Для поддержания изоляции в хорошем состоянии применяют периодическую чистку или обмывку изоляторов. Ручная очистка изоляторов остается в настоящее время основным средством борьбы с загрязнением. Периодичность чистки устанавливается главным инженером предприятия на основе опыта эксплуатации. Обычно она производится один — два раза в год, а в некоторых случаях и более часто. Ручная очистка — весьма трудоемкая операция.

При нецементирующихся загрязнениях очистку изоляторов производят либо сухой тряпкой, либо тряпкой, смоченной в различных растворителях (бензине, керосине) или в трансформаторном масле. Применяется также очистка сжатым воздухом. При сильной цементации слоя загрязнения иногда для очистки применяют металлические щетки, однако та-

кой способ приводит к постепенному разрушению глазури. В аналогичных случаях применяют также химические средства очистки сильно разбавленными серной или соляной кислотами.

Очистка изоляторов токопроводов производится при отключении одной цепи и переводе всей нагрузки на другую — без перерыва питания потребителей. В начале и конце отключенного токопровода, а также в непосредственной близости от места, где производится чистка, накладывают заземляющие закоротки.

Токопроводы, размещаемые в закрытых галереях, обычно выполняют таким образом, чтобы между ограждением и шинами оставался проход для обслуживающего персонала, что значительно облегчает работы по очистке изоляторов. Очистка изоляторов токопроводов, проложенных на открытом воздухе, производится с автомашин с телескопическими вышками или гидроподъемниками.

Увеличения интервалов времени между чистками изоляторов можно добиться нанесением на изоляторы специальных паст, которые все шире применяются для подстанционной изоляции. Наилучшие результаты дают гидрофобные покрытия в виде кремнийорганических синтетических вазелинов (силиконов). Поверхность изоляторов, покрытых слоем такой смазки, поглощает больше загрязняющих частиц, чем поверхность необработанных изоляторов. Однако эти частицы сразу же обволакиваются смазкой и не взаимодействуют с атмосферной влагой. Гидрофобные покрытия не только позволяют увеличить интервалы между чистками, но также способствуют облегчению ручной чистки при цементирующихся загрязнениях. Широкое применение гидрофобных паст на кремнийорганической основе сдерживается их высокой стоимостью и дефицитностью. Для токопроводов 6—10 кВ такие пасты пока не применяются.

Ручная очистка изоляторов на отключенной цепи токопровода при работающей второй цепи, должна выполняться по оформленному надлежащим образом наряду. Производитель работ может приступить к работе по наряду лишь по получении разрешения, которое дается ему ответственным лицом, после отключения цепи, на которой должны производиться работы.

После получения и оформления разрешения приступить к работе производитель работ выполняет проверку отсутствия напряжения, накладывает зажимы заземления и допускает бригаду к работе. Для проверки отсутствия напряжения применяется указатель напряжения. Для заземления сначала присоединяется заземляющий провод переносного заземления к заземлителю, проверяется отсутствие напряжения и только после этого производится наложение и закрепление зажимов переносного заземления на шинах или проводах токопровода. Снятие переносного заземления производится в обратном порядке.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семчинов А. М. Токопроводы промышленных предприятий. — Л.: Энергия, 1972.
2. Гибкие токопроводы в системах электроснабжения промпредприятий/В. Б. Куинджи, Г. П. Смидович, А. Ф. Черниговский, Б. Я. Душацкий. — М.: Энергия, 1974.
3. Бойченко В. И. Монтаж токопроводов 6—10 кВ. — М.: Энергия, 1968.
4. Овчаренко А. С., Юрковская Э. Е. Трубчатые токопроводы для электроснабжения промышленных предприятий. — М.: Энергия, 1976.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие . . . . .	3
1. Схемы электроснабжения промышленных предприятий с применением токопроводов 6—10 кВ . . . . .	4
2. Факторы, определяющие технико-экономические показатели токопроводов . . . . .	12
3. Активное и индуктивное сопротивление токопроводов . . . . .	28
4. Потери мощности и напряжения . . . . .	31
5. Расчет динамической устойчивости жестких токопроводов при коротких замыканиях . . . . .	34
6. Устройство и характеристики токопроводов разных типов . . . . .	39
7. Защита и заземление . . . . .	65
8. Монтаж токопроводов . . . . .	71
9. Приемосдаточные испытания и эксплуатация токопроводов . . . . .	84
Список литературы . . . . .	88

25 к.

Еще больше электротехнической  
литературы на  
[www.kitnet.narod.ru](http://www.kitnet.narod.ru)