

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ПЕТЕРБУРГСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ РУКОВОДЯЩИХ РАБОТНИКОВ И СПЕЦИАЛИСТОВ
(ПЭИПК)

КАФЕДРА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ,
ПОДСТАНЦИЙ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Канискин В.А., Таджибаев А.И.

Эксплуатация силовых электрических кабелей

Часть 1.

Конструкции силовых электрических кабелей

Учебное пособие

Санкт-Петербург

2001

УДК 621.315.2 /075.8/

КАНИСКИН ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ, доктор технических наук,
профессор,

ТАДЖИБАЕВ АЛЕКСЕЙ ИБРАГИМОВИЧ, кандидат технических наук,
доцент

**Эксплуатация силовых электрических кабелей.
Часть 1. Конструкции силовых электрических кабелей.**

Учебное пособие

Одобрено и рекомендовано к опубликованию ученым советом института.
Протокол № 9 от 27 июня 2001 г.

Учебное пособие посвящено конструкциям, их особенностям, областям применения силовых электрических кабелей и кабельной арматуры. Рассмотрены силовые нераспространяющие горение и огнестойкие кабели, дается описание современных методов испытаний с количественной оценкой параметров. Приведены параметры разработанных силовых кабелей с пластмассовой изоляцией на напряжение 110–500 кВ, предназначенных для замены маслонаполненных кабелей. Рассмотрены конструкции и комплектации самых современных термоусаживаемых муфт, предназначенных для кабелей с бумажной пропитанной и пластмассовой изоляцией. Предназначено для специалистов, занимающихся обслуживанием, ремонтом и испытаниями силовых кабелей.

Научный редактор: кандидат технических наук Корепанов А.А.

©Петербургский энергетический институт повышения квалификации
руководящих работников и специалистов Министерства энергетики
Российской Федерации

Санкт-Петербург
2001

ВВЕДЕНИЕ.

Силовые кабели предназначены для передачи и распределения электрической энергии при напряжении промышленной частоты и при постоянном напряжении.

Кабели низкого напряжения (до 35 кВ включительно) применяются для снабжения крупных предприятий и городов. Для электроснабжения больших городов применяются силовые кабели высокого напряжения 110-500 кВ.

При передаче энергии на дальние расстояния применяются воздушные линии электропередач при напряжении 110-1150 кВ, однако при пересечении водных пространств, в горных местностях, для вывода мощности от генераторов электростанций, схемных соединений, “глубоких” вводов в города, питание аэропортов и т.п. применяют кабели высокого напряжения.

Во многих странах кабели с пластмассовой изоляцией полностью вытеснили кабели низкого напряжения с бумажно-пропитанной изоляцией; в других странах эта тенденция набирает силу. Кабели с пластмассовой изоляцией высокого напряжения начинают вытеснять маслонеполненные кабели и эта тенденция будет усиливаться на напряжение до 500 кВ включительно. При этом большое значение уделяется вопросам разработки, конструирования, технологии изолирования и прогнозу сроков службы кабелей с полиэтиленовой изоляцией. Надеемся, что предлагаемое учебное пособие будет способствовать подготовке специалистов, в области кабельной техники.

1.1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ КАБЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

В 1812 г. видный русский ученый и русский ученый и изобретатель Шиллинг Павел Львович впервые предложил электрические провода с гуттаперчевой изоляцией и осуществил взрывание мин, заложенных на дне реки Невы. С этого момента и начинается история развития кабельной техники.

В Англии в 1816 г. Была проложена кабельная линия длиной 150 м. Пять медных проводников были заключены в трубки и уложены в деревянные желоба, которые обертывались кошмой. Линия была проложена в земле на глубине примерно одного метра. Работала она не устойчиво, стекло трескалось, изоляция нарушалась. Следующим шагом явилось изобретение в 1840 г. пресса для непрерывного наложения изобретения резиновой изоляции на провода, что значительно увеличило производительность труда при изготовлении проводов. В 1844 г. в США была создана первая линия связи с аппаратом Морзе, а первая воздушная линия была создана в 1854 г. Первая телеграфная подводная кабельная линия связи через Атлантический океан, протяженностью около 5000 км, была проложена в 1856 г.; глубина прокладки в некоторых местах достигала 5 км. Был выполнен большой объем работ и затрачено большое количество электрических материалов. Несмотря на большие капитальные затраты, эта линия не работала, и создатели вынуждены были ее оставить. Несколько первых распределительных систем для передачи электроэнергии было сооружено в Англии в 1870-1880 гг. Эти линии были выполнены с помощью голых медных жил, изолированных от земли стеклянными или фарфоровыми изоляторами.

Начало развитию телефонной связи положило изобретение в 1876 г. американским профессором физиологии речи А. Г. Беллом телефона. Первые воздушные проводные телефонные линии связи были сооружены в 1877 г. в США и в Европе, а первая в мире телефонная станция была открыта в США в 1878 г. в г. Нью-Хейвене, штат Коннектикут.

Дальнейшее развитие электрические кабели получили после создания первой свинцовой герметизирующей оболочки в 1878 г., а в 1879 г. уже был изобретен свинцовый пресс для наложения оболочки на кабель. Это дало возможность создать в 1884 г. первый силовой кабель на напряжение 2 кВ с пропитанной джутовой изоляцией и непрерывной свинцовой оболочкой. Изобретение стальной ленточной брони для кабелей, непосредственно прокладываемых в грунте в 1885 г., позволило предохранять кабели от механических повреждений. В 1889-1890 гг. явились началом применения бумажной изоляции в производстве силовых кабелей, что позволило повысить рабочее напряжение с 2 до 10 кВ.

Окончание монтажа первой удачной кабельной линии с применением изолированных жил осуществил в Англии Ферранти в 1891 г. Его кабели были на напряжение 10 кВ, однако строительная длина составляла всего лишь 6 м, поэтому для линии длиной в 48 км потребовалось примерно 7-8 тысяч соединительных муфт, что создало большие трудности при монтаже линии. Передача больших мощностей по силовым кабелям поставила задачу увеличения рабочих напряжений. Так, в 1908 г. был изготовлен трехжильный кабель с поясной изоляцией на 20 кВ. Подобные кабели, проложенные в г. Баку в 1912 г., находились в эксплуатации еще и после 1990 г. В 1910 г. уже был изготовлен трехжильный силовой кабель на напряжение 30 кВ с поясной изоляцией, однако несовершенство конструкции и технологии изготовления обнаружили много недостатков во время эксплуатации. В 1911 г. были изготовлены три одножильных силовых кабеля на напряжение 60 кВ. В 1914 г. Хохштедер М. запатентовал конструкцию многожильного силового кабеля с экранированными жилами (Н-кабель), а массовое производство таких кабелей началось за рубежом в 1918-1919 гг. В 1923 г. была сооружена опытная линия на напряжение 130 кВ длиной 600 м, выполненная тремя одножильными кабелями с каналом внутри токопроводящей жилы, соединенными со специальными подпитывающими резервуарами. Применение маловязкого масла и обеспечение постоянной подпитки полностью исключили из изоляции воздушные включения, что позволило увеличить почти в 2 раза рабочую напряженность электрического поля в изоляции и повысить рабочую температуру. Первые конструкции таких маслонаполненных кабелей были предложены еще в 1918 г. итальянским инженером Л. Эмануэли. Успешная эксплуатация этой линии положила начало распространению таких кабелей в ряде стран.

Одновременно велись работы по созданию газонаполненных кабелей, в которых в качестве электрической изоляции использовали сжатый газ. В 1932 г. была проложена первая промышленная газоизолированная линия на напряжение 66 кВ, а первая линия на напряжение 138 кВ была проложена в 1937 г.

В 1932 г. было начато производство маслонаполненных кабелей в стальных трубках высокого давления (до 1,6 МПа). Стальная труба представляет прекрасную защиту кабеля от механических повреждений. Первые маслонаполненные кабели напряжением 220 кВ были проложены около г. Парижа в 1936—1939 гг. и определили хорошую перспективу на будущее.

П. Л. Шиллинг положил не только начало истории кабельной техники, но в 1832 г. он впервые продемонстрировал изобретенный им электромагнитный телеграф. Он отстаивал идею воздушного подвешивания телеграфных

проводов, разрабатывая конструкции подводных и подземных кабелей. Другой выдающийся русский физик и электротехник, академик Б. С. Якоби изобрел первый в мире практический электродвигатель в 1834 г., в котором для обмоток применялись провода. В 1841 г. Б. С. Якоби построил первые в мире подземные линии электрического телеграфа, для которых он создал конструкции кабелей и наладил их производство. В 1850 г. Б. С. Якоби сконструировал первый буквопечатающий телеграфный аппарат, который дал большой импульс развитию телеграфной связи. В 1879 г. был основан завод "Севкабель" и положено начало промышленного производства на нем. В 1880 г. в России была создана первая воздушная телефонная линия – линия военного ведомства длиной около одного километра в г. Чернигове. Две линии частного пользования в Нижнем Новгороде протяженностью около 1,5 км и в г. Феллине (ныне г. Вильянди, Эстония) протяженностью около 0,8 км начали действовать в 1881 г. Первые телефоны в г. Москве были установлены в 1882 г., что послужило началом телефонизации города.

Изобретение радио русским ученым – профессором А. С. Поповым в 1895 г. явилось началом бурного развития беспроводной системы связи.

Мощное развитие электроэнергетики и системы связи получили после Великой Октябрьской социалистической революции. Огромное народнохозяйственное и политическое значение имело создание в 1920 г. знаменитого плана электрификации Советской страны, составленного по поручению В. И. Ленина Государственной комиссией по электрификации России (ГОЭЛРО) под председательством Г. М. Кржижановского.

Этот план предполагал не только создание электрических станций, но и развитие линий электропередач и распределительной кабельной сети.

Большое значение в развитии кабельной техники играет завод "Севкабель". Первая в нашей стране и в мире конструкция трехжильных кабелей с отдельно изолированными и освинцованными жилами на напряжение 20 и 35 кВ (марка ОСБ) была предложена в 1924 г. инженерами завода "Севкабель" С. М. Брагиным и С. Я. Яковлевым. В 1924-1925 гг. было проложено в г. Ленинграде кольцо из кабеля на напряжение 33 кВ, изготовленное заводом "Севкабель", которое успешно эксплуатировалось и после 1955 г. Впервые в нашей стране в 1925 г. на заводе "Севкабель" начался промышленный выпуск эмалированных проводов, который послужил широкому развитию электроники и радиотехники. Разработанная и изготовленная на заводе "Севкабель" под руководством инженера Д. В. Быкова первая в нашей стране опытная линия из маслonaполненного кабеля на 110 кВ длиной 1,1 км, была проложена под г. Ленинградом в 1931 г.

Первый в нашей стране опытный образец маслonaполненного кабеля на 220 кВ был изготовлен на заводе "Севкабель" в 1932 г. Получили также

развитие газоизолированные линии. Первая опытная линия на напряжение 35 кВ смонтирована в 1952 г. в Ленэнерго. В 1973-1974 гг. введены в работу первые опытные газоизолированные линии электропередачи 110 кВ в Мосэнерго и 220 кВ в Ленэнерго.

Впервые в нашей стране в 1932 г. была создана кафедра в Ленинградском политехническом институте имени М. И. Калинина, которая начала подготовку инженеров по специальности "Электроизоляционная и кабельная техника".

Начиная с 1947 г., коллективами Всесоюзного научно-исследовательского, проектно-конструкторского и технологического института кабельной промышленности (ВНИИКП), заводов "Севкабель", "Москабель" и несколько позднее "Камкабель" была проделана огромная работа по созданию конструкций кабелей на высокие напряжения и различной аппаратуры к ним. Получили развитие линии постоянного тока.

В 1950 г. была введена в строй промышленная кабельная линия Кашира – Москва постоянного тока на напряжение 220 кВ, длиной 112 км.

Кабельная промышленность выпускает голые провода для воздушных линий электропередач. Рост напряжений – основное средство повышения мощности, дальности и экономичности линии – в основном начался в нашем столетии. Так, в 1901 г. напряжение поднялось до 15 кВ, в 1904 г. до 35 кВ, в 1911 г. до 100 кВ, в 1925 г. до 220 кВ, в 1938 г. до 380 кВ, в 1956 г. до 400 кВ (линия Волжская ГЭС–Москва), в 1961 г. до 500 кВ (первые в мире линии Волжская ГЭС – Москва и Волжская ГЭС – Златоуст), в 1967 г. до 750 кВ (опытно-промышленная линия Конаково – Москва).

В настоящее время освоена линия 1150 кВ переменного тока.

Для передачи информации на расстояние люди издавна использовали звуковую и световую энергию. Для увеличения дальности передачи применялись цепочки переприемных сигнальных постов. В начале XIX столетия действовала семафорная линия связи Петербург – Варшава протяженностью 1200 км. Через каждые 40 км на высоких опорах располагались установки для повторения передаваемых сигналов. Передача по такой линии даже коротких сообщений длилась несколько часов, она зависела от погоды и не была защищена от помех и перехватов.

В настоящее время предусмотрено освоение новых типов волоконно-оптических кабелей. Особая актуальность и хозяйственное значение этой задачи обусловлены ограниченными ресурсами меди и свинца, а кабельная промышленность потребляет до 50% меди и 25% свинца общих ресурсов. Оптические кабели не требуют дефицитных материалов и изготавливаются, как правило, из стекла и полимеров.

Оптические кабели могут передавать большой объем информации, высокая защищенность от внешних помех, малые габаритные размеры, масса в 10 раз меньше электрических, поэтому они постепенно будут вытеснять электрические кабели связи. Важнейшим фактором в развитии оптических кабелей и систем явилось создание оптического квантового генератора – лазера, создателями которого являются советские академики Н. Г. Басов и А.М. Прохоров и американский ученый Таунс. Они выполнили фундаментальные исследования в области оптоэлектроники и квантовой техники, что позволило на практике реализовать возможность передачи информации по оптическим кабелям.

Отечественная кабельная промышленность до Великой Октябрьской социалистической революции была слабо развита. В то время насчитывалось всего три завода "СКЗ" – Соединенные кабельные заводы", состоящие из двух маленьких заводов по разным сторонам Кожевенной линии в г. Петрограде, переименованные в сентябре 1918 г. по предложению Г. М. Кржижановского в "Северный кабельный завод" – "Севкабель"; двух заводов в г. Москве – "Рускабель", позднее переименованный в "Москабель", и "Электропровод".

Кабельная промышленность, в основном, принадлежала иностранным капиталистам и работала по их технической документации.

Бурное развитие кабельная промышленность получила в годы Советской власти. В настоящее время большое количество кабельных заводов, которые обеспечивают нашу страну кабельными изделиями. Среди этих заводов выделяются такие крупные заводы, как "Москабель", "Севкабель", "Камкабель", "Куйбышевкабель" и многие другие.

В настоящее время создана Ассоциация "Электрокабель". Она объединяет около 60 кабельных заводов, научно-исследовательских институтов, торгово-коммерческих организаций, а также предприятия, связанные с потреблением кабельной продукции из России, стран СНГ и Балтии. Цель Ассоциации – обеспечение стабильной хозяйственной деятельности кабельных предприятий, координация научно-исследовательской деятельности участников, развитие кооперации, организация совместных производств.

Работники кабельной промышленности хорошо помнят тех замечательных людей, которые задолго до революции вписали немало славных страниц в историю кабельной промышленности. В 1906 году кабельные сети "Общества электрического освещения 1886 г." в Петербурге возглавлял талантливый инженер-электрик, видный деятель и будущий выдающийся дипломат Л. Б. Красин. В те же годы василеостровские кабельные сети Петрограда обслуживал в должности монтера, а затем инженера будущий председатель комиссии по подготовке плана ГОЭЛРО,

видный государственный деятель и электроэнергетик, академик Г.М. Кржижановский.

Первый цех алмазного инструмента в России, который оказал большое влияние на волочение кабельных изделий, был пущен в 1894 году благодаря большой инженерно-организационной деятельности талантливого инженера К. С. Алексеева. Под его руководством фабрика завоевала передовые рубежи; в 1900 году на Всемирной выставке в г. Париже продукция фабрики получила золотые медали (Гран-при). К. С. Алексеев и другие работники фабрики были награждены медалями и дипломами Всемирной выставки. К.С. Алексеев увлекался театром, в 1898 году он совместно с В.И. Немировичем-Данченко основал Московский Художественный театр, становится главным режиссером и директором театра, постепенно отходит от инженерной деятельности и под фамилией Станиславский он стал всемирно известным актером, режиссером и реформатором театра, педагогом, основоположником науки о сценическом искусстве.

1.2. КОНСТРУКЦИИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ.

Силовые кабели и кабельные линии предназначены для передачи и распределения электрической энергии при напряжении промышленной частоты и при постоянном напряжении.

При передаче электроэнергии на дальние расстояния при напряжении 110-750 кВ предпочтение отдается воздушным ЛЭП. Это объясняется двумя главными причинами:

а) мал возможный радиус их действия, т.е. мала их “критическая” длина, которая определяется емкостным током

$$I_c = U_\phi \omega C \ell \quad (1)$$

емкостный ток суммируется с предельным рабочим током кабеля I_k . Если $I_k = I_c$, что формально можно определить “критическую” длину кабеля

$$\ell_{кр} = \frac{I}{U_\omega \cdot \omega C}, \quad (2)$$

где C - емкость обычного кабеля; U_ϕ - разное напряжение.

Для кабелей обычного исполнения на напряжение 220-500 кВ “критическая” длина составляет всего 30-40 км. Для передачи электроэнергии на большие расстояния потребовалось бы поперечная компенсация ее реактивной мощности шунтирующими реакторами на концах линии и в нескольких ее промежуточных точках;

б) большая стоимость кабельной ЛЭП, которая может составлять в 10-20 раз больше воздушной ЛЭП.

Поэтому кабельные линии находят применение при пересечении водных пространств, для вывода мощности и схемных соединений на электростанциях, в горных местностях, для аэропортов, в распределительных сетях городов и промышленных предприятий и т.д.

Кабельные линии передают электроэнергию в соединении с воздушными ЛЭП. По состоянию на 1982 г. суммарная пропускная способность ЛЭП и вставок постоянного тока во всем мире составила около 12 ГВт, т.е. по ним распределяется примерно 0,6 % всей вырабатываемой на электростанциях электроэнергии. Таким образом, можно ориентировочно считать, что количество кабельных линий переменного тока будет примерно составлять 99,4 %, а постоянного тока - 0,6 %.

1.2.1. Классификация и маркировка силовых кабелей.

Силовые кабели можно классифицировать по разным признакам: конструктивным особенностям, по виду изоляции, по характерным условиям эксплуатации, но наиболее распространена классификация по величине номинального напряжения (рис. 1).

По номинальному рабочему напряжению все силовые кабели условно можно разделить на две группы. В группу низкого напряжения (НН) включены кабели, работающие в электрических сетях с изолированной нейтралью переменного напряжения 1, 3, 6, 10, 20 и 35 кВ частотой 50 Гц (в некоторых зарубежных странах 60 Гц); они могут работать в сетях переменного напряжения с заземленной нейтралью и в сетях постоянного напряжения.

Кабели НН выпускаются в зависимости от назначения 1-жильные, 2-жильные, 3-жильные и 4-жильные (рис. 2 и 3). Одно- и трехжильные кабели работают в сетях напряжением 1-35 кВ, двух- и четырехжильные работают в сетях до 1 кВ; 4-жильные кабели предназначены для 4-проводных сетей переменного напряжения. Четвертая жила является заземляющей или зануляющей, поэтому ее сечение, как правило, меньше сечения основных жил; однако во взрывоопасных помещениях и в некоторых других случаях сечение четвертой жилы равно сечению основных жил. Кабели НН выпускаются с пластмассовой, бумажной пропитанной и резиновой изоляцией. Трехжильные кабели до 10 кВ включительно как правило делают с секторными жилами. Это объясняется тем, что конструкция с секторными жилами является более компактной, что существенно сокращает расход материалов на оболочку и наружный защитный покров. Толщина изоляции выбирается для кабелей НН из условий механической и электрической прочности. Для кабелей

напряжением до 3 кВ толщина изоляции выбирается из условий механической прочности. Для кабелей напряжением 20 кВ с секторными жилами возникает резко неоднородное электрическое поле большой величины, поэтому такая конструкция становится не выгодной и секторные жилы находят применение для кабелей только до 10 кВ.

В группу кабелей высокого напряжения (ВН) и сверхвысокого напряжения (СВН), имеющие аналогичные конструкции, относятся кабели для работы в сетях переменного напряжения 110, 220, 330, 380, 500, 750 кВ и выше, а также кабели постоянного напряжения от ± 100 до ± 400 кВ и выше. Кабели ВН изготавливаются с пропитанной маслом бумажной изоляцией - маслonaполненные кабели низкого и высокого давления, газонаполненные кабели и кабели с пластмассовой изоляцией. В группу кабелей ВН входят сверхпроводящие кабели (СПК), которые являются перспективными кабелями в недалеком будущем; для поддержания рабочей температуры СПК требуют охлаждения криогенными сжиженными газами (жидкий гелий, жидкий азот).

Маркировка силовых кабелей включает буквы, обозначающие материалы жилы, изоляции, оболочки и тип защитного покрова. Маркировка кабелей ВН отражает особенности конструкции. Цифры в маркировке обозначают величину номинального напряжения, число жил и их сечения. Медная жила в маркировке не отмечается специальной буквой, алюминиевая жила обозначается буквой А, стоящей в начале маркировки. Следующая буква маркировки обозначает материал изоляции; при этом бумажная пропитанная изоляция не имеет буквенного обозначения, полиэтиленовая обозначается буквой П, поливинилхлоридная - буквой В, резиновая - буквой Р. Следующая буква соответствует типу герметизирующей оболочки: А – алюминиевая, С – свинцовая, П – полиэтиленовый шланг, В – оболочка из поливинилхлорида, Р – резиновая оболочка. Последняя буква маркировки обозначает тип защитного покрова: Б – броня ленточная, стальная; К – броня из круглых стальных оцинкованных проволок; П – броня из плоских стальных проволок. Наружный защитный покров не имеет буквенного обозначения, однако буква Г – обозначает отсутствие наружного защитного покрова (голый). Для кабелей с вертикальной прокладкой (бумажная изоляция с обедненной пропиткой) вводится в конце маркировки буква В, а для нестекающей пропитки бумажной изоляции (на основе церезина) в начале маркировки ставится буква Ц.

Например: АСБ–В 3х120–1 – это трехжильный кабель с алюминиевыми жилами, каждая сечением 120 мм, с бумажной обедненной пропиткой, в общей свинцовой оболочке, с ленточной стальной броней и наружным волокнистым защитным покровом с битумом, на напряжение 1 кВ. ЦСК 3х240–10: трехжильный кабель с медными жилами сечением 240 мм² каждая с бумажной

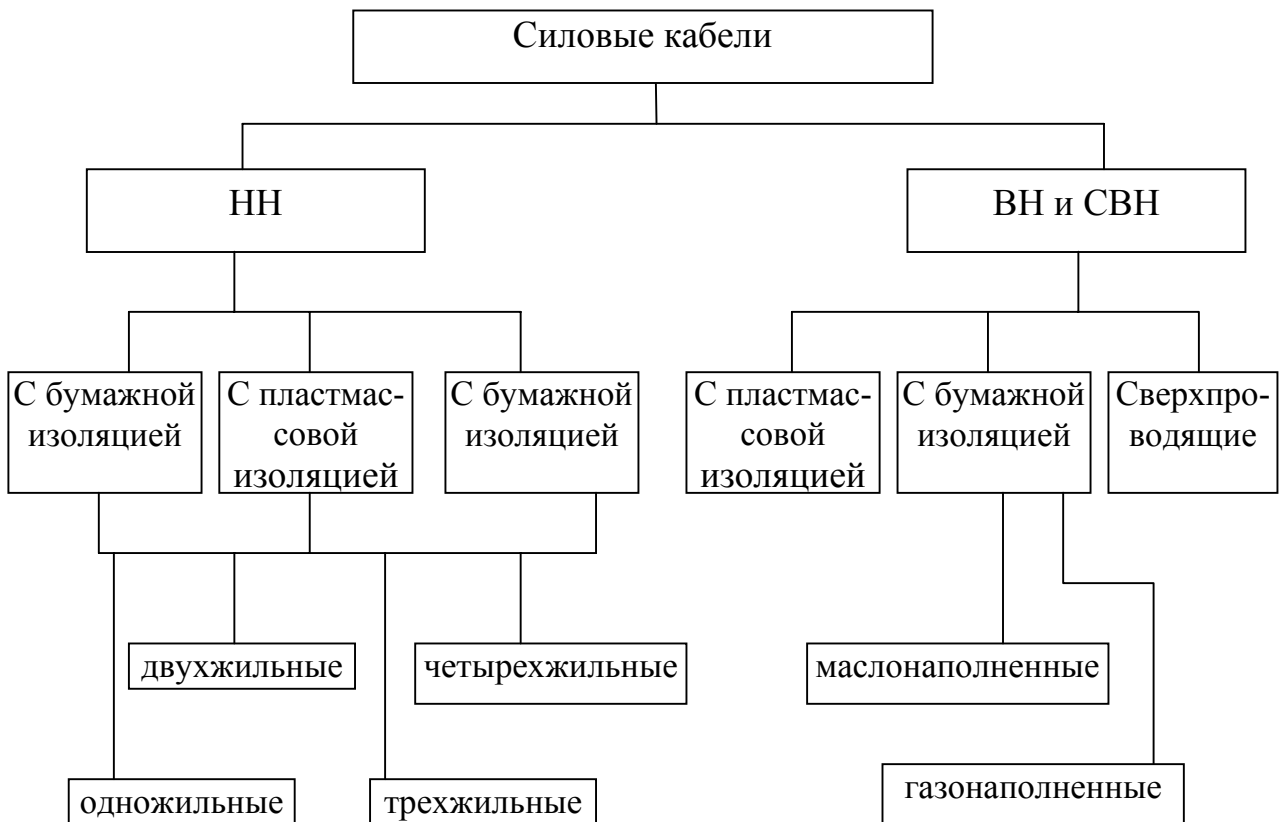


Рис. 1. Квалификация силовых кабелей.

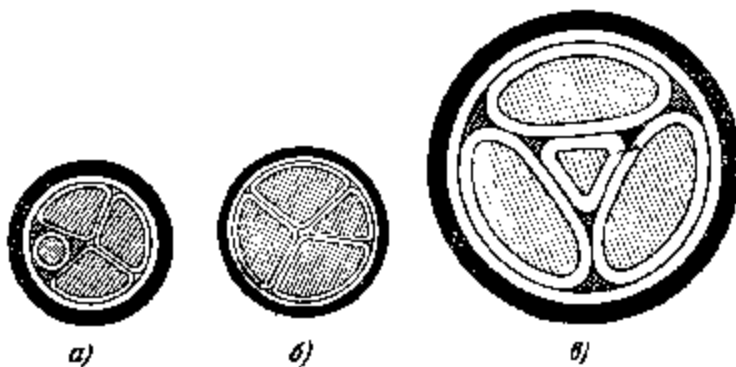


Рис. 2. Конструкции четырехжильных кабелей.

а) – нулевая жила круглой формы; б) – нулевая жила секторной формы; в) – нулевая жила в центре кабеля.

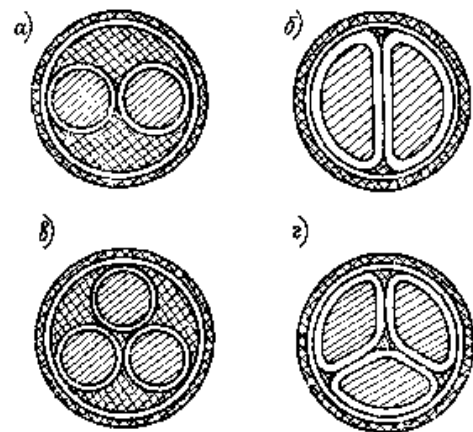


Рис. 3. Силовые кабели любого напряжения.

Двухжильные с круглыми а) и сегментными б) жилами; трехжильные с круглыми в) и секторными г) жилами.

изоляцией и не стекающей пропиткой, в общей свинцовой оболочке, броня из крупных стальных оцинкованных проволок с наружным защитным покровом на напряжение 10 кВ. АПВБГ 3х120–6: трехжильный кабель с алюминиевыми жилами сечением 120 мм^2 , с ПЭ изоляцией, ПВХ оболочкой, ленточной стальной броней покрытой битумом, без наружного волокнистого покрова (для прокладки на воздухе) на напряжение 6 кВ. Кабель АПАШ_в 3х150–1 имеет алюминиевую жилу, ПЭ изоляцию, алюминиевую оболочку и защитный шланг и ПВХП (пластиката).

Маслонаполненные кабели в маркировке содержат букву М, газонаполненные – буква Г, а также букву, характеризующую давление масла и особенности конструкции. Например: МНСК 1х625–220 – это маслонаполненный кабель низкого давления с бумажной масляной изоляцией в свинцовой оболочке с упрочняющим покровом, броней из круглых проволок в одножильном исполнении с медной жилой сечением 625 мм^2 на напряжение 220 кВ. МВДТ 3х500–330 – это маслонаполненный кабель высокого давления в стальном трубопроводе в трехжильном исполнении из медных проволок сечением каждая 500 мм^2 на напряжение 330 кВ.

1.2.2. Кабели с бумажной пропитанной изоляцией низкого напряжения.

Силовые кабели с поясной изоляцией. Основная масса кабелей напряжением до 10 кВ выпускаются трехжильными с секторными жилами с поясной изоляцией (рис. 4). Жилы кабеля могут быть медными или алюминиевыми сечением от 6 до 240 мм^2 . Алюминиевые жилы могут быть однопроволочными во всем диапазоне сечений, а в диапазоне $70\text{-}240 \text{ мм}^2$ могут выпускаться многопроволочные уплотненные. Медные жилы выпускаются в основном многопроволочными, но в диапазоне $6\text{-}50 \text{ мм}^2$ применяются однопроволочные.

Для повышения гибкости жилы скручивают из круглых проволок диаметром 2-4 мм, при этом отсутствует деформация изгиба из-за скольжения проволок относительно друг – друга. Каждый последующий повив проволок производится в противоположном направлении (левый, правый, левый и т.д.). Жилы кабелей 20 и 35 кВ изготавливают круглой формы как правило с откруткой. Жилы скручивают по правилу правильной геометрической скрутки. Обычно в центре расположена одна проволока, значительно реже – три, четыре или пять; конструкция с двумя проволоками в центре не применяются ввиду ее малой устойчивости. При одной проволоке в центре количество проволок в повивах при правильной геометрической скрутке составляет: 1+6+12+18 и т.д.

При числе повивов более двух коэффициент заполнения металлом жилы составляет примерно 74-76 %. Поэтому в зарубежной практике и на наших заводах используют уплотненные круглые жилы (рис. 6). Если уплотнение производится по каждому повиву путем обжатия жилы во вращающихся вальцах, то коэффициент заполнения можно довести до 90 %. При этом уменьшается наружный диаметр кабеля, что приводит к экономии материалов до 10 %. В процессе уплотнения жилы происходит вытяжка проволок. Для крупных сечений жил вытяжка может достигать 10 % и более, что приводит к уменьшению сечения жилы после уплотнения.

Многопроволочные секторные жилы получают путем скрутки специальной заготовки с ее последующим обжатием для получения нужной формы и размеров жил. Секторные жилы трехжильного кабеля с поясной изоляцией сечением до 70 мм² получают после обжатия заготовок, приведенной на рис. 7а. Продольные проволоки, расположенные вблизи оси изгиба, позволяют экономить расход материала жил. Для жил сечением 95 мм² и выше используют для обжатия заготовку, показанную на рис. 7б; здесь имеется только три продольные проволоки, но эта конструкция имеет большую гибкость.

Уплотнение жил сечением до 150 мм² включительно производится по последнему повиву с помощью профилированных уплотняющих вальцов, что дает коэффициент заполнения профильной жилы до 86 %. Для получения больших коэффициентов заполнения производится уплотнение по каждому повиву.

В качестве изоляции используют ленты кабельной бумаги, пропитанные маслоканифольным составом. Каждая жила изолируется отдельно (фазная изоляция), а затем поверх скрученных изолированных жил накладывается общая поясная изоляция (рис. 4). Промежутки между изолированными жилами заполняют жгутами из сульфатной бумаги, т.к. она находится в электрическом поле. Электрическое поле в кабелях с поясной изоляцией имеет сложную форму. Определяющим при выборе толщины фазной и поясной изоляции кабелей напряжением на 6 и 10 кВ является напряженность электрического поля в рабочих и аварийных режимах. В рабочем режиме напряжение между фазами равно линейному, а между фазами и оболочкой – фазному, т.е. в $\sqrt{3}$ раза меньше. При рабочих режимах средние напряженности электрического поля в фазной и поясной изоляции будут примерно равны, если толщина изоляции между жилой и оболочкой будет примерно на 70 % меньше, чем между фазами, что и делается в наших кабельных сетях с изолированной нейтралью при напряжениях до 35 кВ. В аварийном режиме (замыкании одной фазы на оболочку) напряжение между

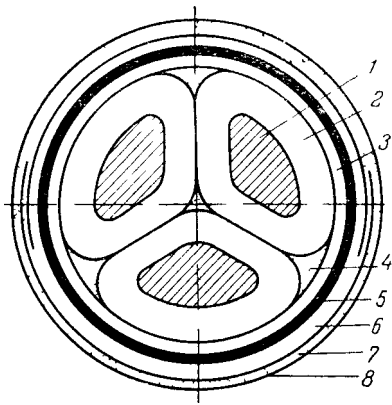


Рис. 4. Трехжильный кабель с поясной изоляцией.
 1 – токопроводящая жила; 2 – жильная изоляция; 3 – поясная изоляция; 4 – межфазные заполнения; 5 – свинцовая или алюминиевая оболочка; 6 – подушка под броню; 7 – броня из двух стальных лент; 8 – наружный защитный покров.

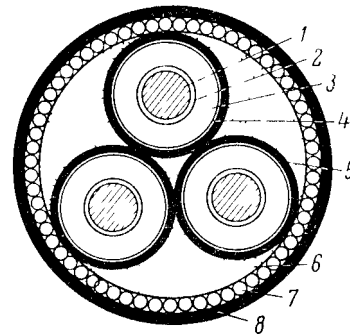


Рис. 5. Трехжильный кабель с отдельно оцинкованными жилами для подводной прокладки.
 1 – токопроводящая жила; 2 – экран из полупроводящей бумаги; 3 – бумажная изоляция; 4 – экран из полупроводящей бумаги; 5 – свинцовая оболочка; 6 – джутовое заполнение; 7 – проволочная броня; 8 – наружный защитный покров.

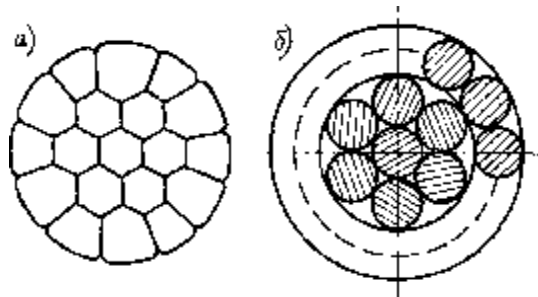


Рис. 6. Круглая токопроводящая жила правильной геометрической скрутки: а) –уплотненная; б) – неуплотненная.

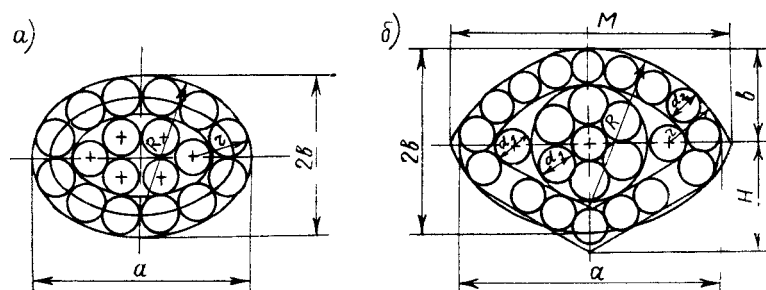


Рис. 7. Конструкция секторных жил (до уплотнения); + проволоки расположены продольно: а) — сечением 25, 35, 50 и 70 мм²; сердцевина выполнена по принципу: 4+2; б) – сечением 70, 95 и 120 мм²; сердцевина выполнена по принципу 1+6+2.

между неповрежденными фазами и оболочкой будет равно линейному, однако такой режим будет кратковременным.

В кабелях на напряжение 1 и 3 кВ толщина изоляции выбирается, как правило, из условия механической прочности (отсутствие механических повреждений при изгибах). Толщина фазной и поясной изоляции в зависимости от сечения жилы для кабелей на напряжения 1 кВ составляет 0,75–0,95 и 0,5–0,6 мм, а для кабелей на напряжение 3 кВ – 1,35 и 0,7 мм соответственно. Для кабелей напряжением 6 кВ и выше толщина изоляции выбирается из условий электрической прочности. Для кабелей на напряжение 6 кВ толщина фазной изоляции составляет 2 мм, а толщина поясной – 0,95 мм, для кабелей на напряжение 10 кВ – соответственно 2,75 и 1,25 мм.

Для выравнивания электрического поля на поверхность жил (выравнивания локальной напряженности поля от отдельных проволок жил – “эффекта проволочности”) накладывают методом обмотки лентами электропроводящую кабельную бумагу марок КПУ-80 и КПУ-120 (кабельная проводящая уплотненная толщиной 80 и 120 мкм, плотность – 900-1050 кг/м³), начиная с напряжения 6 кВ, а для кабелей напряжением 10 кВ и выше, накладываются еще экран и по поверхности изоляции. Удельное объемное сопротивление бумаг составляет 1×10^3 – 9×10^4 Ом·м. Пропиточная масса между пропитанной бумагой и жилой, между пропитанной бумагой и оболочкой, имеющая более низкую электрическую прочность, оказывается вне электрического поля при применении электропроводящих экранов.

Основным недостатком бумажно-пропитанной изоляции (БПИ) является ее большая гигроскопичность, поэтому для защиты от увлажнения кабели выпускают в металлической герметизирующей оболочке. Если ранее кабели выпускали в свинцовой оболочке, то в настоящее время большинство кабелей выпускают в алюминиевой оболочке.

Свинец является дефицитным металлом так же, как и медь. Так содержание в земной коре составляет: свинца – 0,001 %, меди – 0,1 %, алюминия – 7,5 %. Свинец является пластичным материалом: температура плавления составляет 327⁰С, (алюминия – 658⁰С) выпрессовывается свинец при низких давлениях 25 МПа, алюминий – при 45 МПа. Однако алюминий имеет плотность $2,7 \times 10^3$ против $11,34 \times 10^3$ кг/м³ для свинца, что существенно снижает массу кабеля с алюминиевой оболочкой. Учитывая высокую механическую прочность алюминия, кабели с алюминиевыми оболочками не требуют дополнительной защиты в виде брони. Электропроводность алюминия высока (удельное электрическое сопротивление алюминия составляет 29,5, а для свинца – 220 Ом·мм²/км), поэтому алюминиевую оболочку используют в качестве четвертой жилы. По коррозионной стойкости алюминий заметно уступает свинцу. Для улучшения механических

характеристик свинцовые оболочки содержат присадки сурьмы (0,3-0,85 %), олова, меди и теллура (0,03-0,05 %).

Алюминиевые оболочки изготавливают гладкими и гофрированными. В марках кабелей гладкая алюминиевая оболочка обозначается буквой А, гофрированная А_г. Гофрирование повышает устойчивость оболочки при изгибе и ее прочность. При изготовлении и монтаже кабелей с алюминиевыми оболочками диаметром более 40 мм имеют высокую жесткость, поэтому кабели на напряжение 1 кВ сечением 3х240 мм², 6 кВ сечением 3х150 мм² и выше, 10 кВ сечением 3х120 мм² и выше изготавливают с гофрированной алюминиевой оболочкой. Для предупреждения стекания пропиточной массы гофрированные оболочки применяют для кабелей с нестекающей пропиткой. Как правило, металлические оболочки защищают от коррозии и механических повреждений наружными покровами.

Кабели с радиальным электрическим полем на 20 и 35 кВ.

В кабелях с поясной изоляцией с ростом напряжения увеличивается тангенциальная составляющая напряженности поля; при напряжениях 20 кВ и более она близка к предпробивным значениям. Поэтому кабели на 20 и 35 кВ изготавливают в одножильном исполнении с круглыми алюминиевыми или медными жилами в свинцовой и алюминиевой оболочке или в трехжильном исполнении, скрученным из трех круглых изолированных жил, каждая из которых имеет свинцовую оболочку (рис. 5). В такой конструкции практически отсутствует тангенциальная составляющая напряженности поля, поле радиальное, что позволяет применять БПИ с вязким маслоканифольным составом. Трехжильные кабели с радиальным полем имеют марки ОСБ и АОСБ; они были разработаны С.М. Браниным и С.А. Яковлевым на заводе “Севкабель”.

За рубежом большое распространение нашли кабели типа Н – кабели (изобретены немецким инженером М. Хохштедтером). В таком кабеле три изолированные и экранированные круглые жилы имеют общую свинцовую или гофрированную алюминиевую оболочку. Радиальное поле обеспечивается экранами из медных лент на поверхности каждой изолированной жилы. Н – кабели имеют меньшие габариты, что снижает расход материалов. Однако кабели типа ОСБ имеют большую гибкость, меньше пропиточного состава и лучше условия охлаждения.

Кабели с отдельно освинцованными жилами выпускают только с круглыми медными или алюминиевыми жилами многопроволочными уплотненными сечением 25-185 мм² на напряжение 20 кВ и 120-150 мм² на напряжение 35 кВ. Кабели типа ОСБ изготавливают с многопроволочными жилами как правило уплотненными. Для выравнивания электрического поля поверх жилы накладывают экраны из полупроводящей бумаги; поверх

изоляция накладывают такие же экраны, или из полупроводящей металлизированной бумаги, или из полупроводящей бумаги, поверх которой накладывается алюминиевая или медная фольга.

Толщина изоляции кабеля на напряжение 20 кВ составляет 7 мм для сечений 25-95 мм² и 6 мм для сечений жил 120-150 мм²; для кабеля на напряжение 35 кВ – 9 мм для всех сечений.

В зависимости от сечения жилы толщина свинцовой оболочки составляет 1,4-2,8 мм. Алюминиевые оболочки из-за жесткости пока применения не нашли для кабелей на напряжения 20 и 35 кВ.

Кабели для вертикальных прокладок. На кабельных трассах с БПИ с большим перепадом уровней имеется возможность стекания пропиточной массы в нижнюю часть трассы, которое происходит между проволоками в многопроволочных жилах и в пространстве между металлической оболочкой и бумажной изоляцией и мало вероятно по изоляции.

В верхних участках трассы возникают воздушные зазоры в изоляции, что снижает электрическую прочность кабеля. В нижних участках трассы повышается давление пропиточной массы, что может привести к разгерметизации кабеля. Кабели с БПИ обычного исполнения прокладываются на трассах с разностью уровней не более 15-25 м для различных конструкций. Для борьбы с перетеканием пропиточной массы могут применяться следующие мероприятия:

а) Применение стопорных муфт, которые ограничивают перетекание пропиточной массы из одной секции кабельной линии в другую; однако для крутонаклонных и вертикальных трасс применение стопорных муфт не всегда является эффективным.

б) Уменьшение объема пропиточной массы в кабеле – обедненная пропитка изоляции. В таких кабелях после пропитки проводится операция обеднения изоляции, при которой из кабеля удаляется пропиточная масса из зазоров между проволоками в жиле и бумажными лентами. Такие кабели можно прокладывать на трассах с разностью уровней 100 м со свинцовой оболочкой и неограничено для кабелей с алюминиевой оболочкой. Электрическая прочность таких кабелей ниже, чем кабелей с полной пропиткой, поэтому они применяются на номинальное напряжение до 6 кВ. При этом толщина изоляции с обедненной пропиткой больше, чем с полной; например, толщина изоляции с обедненной пропиткой кабелей на 6 кВ соответствует толщине изоляции кабелей на 10 кВ с полной пропиткой. Возможность применения кабелей с обедненной пропиткой для вертикальных прокладок указана в маркировке кабелей; например, кабель АСБУ–В 3х120–3 – это трехжильный кабель АСБ с сечением жил 120 мм² на напряжение 3 кВ с обедненной пропитанной изоляцией.

в) Увеличение вязкости пропиточной массы – нестекающая пропитка. Кабели с нестекающей пропиткой не имеют ограничений разности уровней на вертикальных и крутонаклонных трассах кабельных линий.

Кабели с БПИ с нестекающей пропиткой выпускают на напряжение 6, 10 и 35 кВ в одножильном и трехжильном исполнении. Конструкция таких кабелей принципиально ничем не отличается от конструкции обычных кабелей, но для кабелей напряжением 35 кВ для увеличения электрической прочности слой изоляции, прилегающий к жиле толщиной 1,1 мм, выполняется из лент высоковольтной кабельной бумаги с толщиной лент 0,08 мм, а последующие слои – из высоковольтной кабельной бумаги толщиной 0,12 мм. Маркировка кабелей с нестекающей пропиткой начинается с буквы Ц (в пропиточной массе имеется церезин), например, ЦОСБУ 3х120–35 – это трехжильный кабель с медными жилами отдельно освинцованными, сечением 120 мм², напряжение 35 кВ с БПИ с нестекающей пропиткой с ленточной стальной броней с наружным защитным покровом.

Общие требования к кабелям с БПИ на напряжение 1–35 кВ. Такие кабели предназначены для эксплуатации при температурах $\pm 50^{\circ}$ С. При прокладке кабелей минимальный радиус изгиба должен быть не менее 15-кратного наружного диаметра кабеля для многожильных кабелей в свинцовой оболочке и 25-кратного – для остальных кабелей. Длительно допустимая температура жил кабелей (рабочая температура) на напряжение 1-35 кВ указана в таблице 1.

Таблица 1.

**Длительно допустимая температура жил кабелей с БПИ
на напряжение 1-35 кВ.**

Номинальное напряжение, кВ	Пропитка изоляции	Допустимая рабочая температура, °С
1 и 3	Вязкая	80
	Обедненная	80
6	Вязкая	65
	Обедненная	75
10	Вязкая	60
20	Вязкая	55
35	Вязкая	50

Электрическое сопротивление изоляции при 20° С составляет не менее 200 МОм/км для кабелей на напряжение 6 кВ и выше.

Тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$ не превышает величины 0,0080 на строительной длине при напряжении 0,5 U_n номинального. Гарантированный срок службы кабеля составляет не менее 25 лет.

2.3. Силовые кабели с пластмассовой изоляцией на напряжение 1–35 кВ.

Применение пластмасс для изоляции силовых кабелей дает возможность существенно упростить технологию их изготовления. Пластмассовая изоляция накладывается на жилы методом экструзии (выдавливания) на червячных прессах – это значительно более производительный процесс, чем изолирование методом обмотки бумажными лентами, сушки и пропитки бумажной изоляции. Отсутствие металлической герметизирующей оболочки существенно облегчает конструкцию кабелей, хотя предусмотрено поверх экрана по изоляции наложение двух лент металлической фольги, а для кабелей высокого напряжения подводной прокладки предусмотрена свинцовая оболочка, препятствующая увлажнению пластмассовой изоляции и, соответственно, зарождению и росту водных триингов. Для кабелей с пластмассовой изоляцией упрощается прокладка и монтаж и отсутствует ограничение по перепаду уровней на кабельных трассах.

Для замены БПИ применяют полиэтилен (ПЭ), поливинилхлоридный пластикат (ПВХП) и этиленпропиленовую резину (ЭПР) (табл. 2).

Таблица 2.

Параметры пластмасс для силовых кабелей

Материал	ρ_v , Ом · см при температуре, °С		ϵ при температуре, °С		$tg\delta$ при температуре, °С		Уд. термическое сопротивление, м·К/ВТ
	10	90	10	90	10	90	
ПЭ	10^{17}	10^{15}	2,25	2,2	$3 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-5}$	3,8
ПВХП	10^{15}	$2 \cdot 10^{11}$	4	8,6	$5 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-2}$	7
ЭПР	$7 \cdot 10^{15}$	10^{14}	2,6	2,6	$2 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}	6,1

Параметры кабелей, рекомендуемые МЭК, приведены в табл. 3.

Таблица 3.

Параметры кабелей с пластмассовой изоляцией.

Материал изоляции	U_n , кВ	Толщина изоляции, мм	$E_{раб}$, МВ/м	
			средняя	максимальная
ПЭ	10	3,4	1,7	2,7
	20	5,5	2,1	3,3
	30	8	2,2	3,6
ПВХП	10	4	1,5	2,1
	20	6,4	1,8	3

Одним из наиболее перспективных материалов является ПЭ; он имеет ряд существенных преимуществ перед другими полимерами по электрическим параметрам, влагостоек, имеет хорошую гибкость. Из всех известных полимеров только ПЭ можно получить очень чистым, с минимальным содержанием примесей, поэтому его можно применять при высоких напряжениях электрического поля $E_{\text{раб}}$.

Наиболее пригодным для изоляции кабелей является сшитый (вулканизированный) ПЭ (СПЭ), который имеет пространственную структуру молекулы, т.е. является термореактивным полимером (не плавится). Электрические свойства СПЭ находятся на уровне пластичного ПЭ, а нагревостойкость выше (табл. 4).

Таблица 4.

Нагревостойкость пластмасс для силовых кабелей.

Материал изоляции	Длительная температура (рабочая), °С	предельно допустимая температура при коротком замыкании, °С
ПЭ	70	150
СПЭ	90	250
ПВХ П	70	160
ЭПР	90	250

Примечание: кабели с бумажной изоляцией допускают кратковременный нагрев при КЗ до 200°С.

Толщина изоляции в зависимости от напряжения и сечения жил составляет 0,6-3,4 мм. В основном кабели имеют круглую форму. В качестве межфазного заполнения используют материал изоляции. Для кабелей до 3 кВ включительно можно применять заполнения из непропитанной кабельной пряжи, штапелированной стеклянной пряжи или подобных других материалов. Кабели некоторых типов до 1 кВ могут быть без заполнений. Двухжильные кабели сечением до 16 мм² на напряжения до 1 кВ изготавливают плоскими. Поверх скрученных изолированных жил в кабелях на напряжение на 1 кВ накладывают с перекрытием ленту из полиэтилентерефталатной (ПЭТФ) или поливинилхлоридной пленки, а затем оболочку из ПВХ П. Для остальных кабелей накладывается поясная изоляция толщиной 0,4-1,1 мм из ПВХ П или материала изоляции.

В кабелях напряжением 6 кВ поверх поясной изоляции накладывается методом экскрузии или обмоткой лентами экран из электропроводящего материала, соответствующего материалу изоляции, толщиной 0,2 мм. Для большинства кабелей этого класса напряжений поверх электропроводящего

экрана накладывают металлический экран из медных или алюминиевых лент или фольги в комбинации из ПЭТФ или ПВХП пленки. Для защиты от увлажнения и механических повреждений кабели имеют пластмассовую или алюминиевую оболочку.

Такие кабели предназначены для эксплуатации при температуре окружающей среды от -50 до $+50^{\circ}\text{C}$. Допустимый нагрев жил кабелей в аварийном режиме, не превышающем 8 ч. в сутки и не более 1000 ч. за срок службы, не должен превышать 80°C для изоляции из ПВХ П, ПЭ и самозатухающего ПЭ (в маркировке кабеля – Пс) и 130°C – для изоляции из вулканизированного (сшитого) СПЭ (в маркировке – Пв).

На напряжения 10-35 кВ выпускают кабели, как правило, из СПЭ как одножильные в большинстве случаев, так и трехжильные.

Отечественные 1-жильные кабели с изоляцией из СПЭ на напряжение 10 кВ изготавливают с алюминиевыми жилами сечением 120-240 мм², толщина изоляции – 4 мм; толщина оболочки – 1,9-2,1 мм может быть из ПВХ П, светостабилизированного самозатухающего ПЭ, толщина экранов по жиле и изоляции – 0,7 мм. Поверх экрана по изоляции накладывают экран из медной ленты, гофрированной в поперечном направлении и наложенной продольно с перекрытием. Между медным экраном и оболочкой продольно накладывается ПЭТФ лента.

Кабель должен выдержать испытание переменным напряжением 40 кВ в течение 4 ч.; уровень частичных разрядов (ЧР) должен быть не более 5 пКл при напряжении 15 кВ на строительных длинах не менее 500 м. Длительная рабочая температура составляет 90°C .

Кабели на 35 кВ имеют аналогичную конструкцию. Изоляция изготовлена из СПЭ, оболочка – ПЭ, самозатухающий ПЭ или ПВХ П. Сечение медных или алюминиевых жил – 95-240 мм²; толщина изоляции – 7 мм; толщина экрана по жиле – 1,0 мм, по изоляции – 0,4 мм; толщина оболочки – 2,3-2,5 мм. Кабель должен выдерживать переменное напряжение 88 кВ в течение 15 мин, переменное напряжение 80 кВ в течение 4 ч. Уровень ЧР на строительных длинах – не менее 20 пКл при 52 кВ.

Кабели на 35 кВ испытывают на надежность в воде с содержанием 0,5% **NaCl**. Образцы кабеля помещают в стальную трубу с уплотнительными фланцами, заполненную водой под давлением 2 МПа (20 атм); образцы соединяются последовательно и подвергаются 200 циклов нагрева и охлаждения: между жилой и экраном прикладывается переменное напряжение 35 кВ. Один цикл состоит из нагрева током по жиле до 90°C и выдержки при установившейся температуре 4 ч, а затем охлаждение. Последние 20 циклов нагреваются до 130°C .

После 200 циклов нагрева и охлаждения образцы кабеля должны выдерживать испытание напряжением 175 кВ в течение 10 мин.

В России выпускаются силовые кабели с пластмассовой изоляцией специального назначения, например, кабели для гермозоны атомных электростанций на напряжение 1 и 6 кВ. Они предназначены для работы при температуре окружающей среды от -50 до $+60^{\circ}\text{C}$, влажности до 90 % и уровне радиации 0,1 Гр/ч. Эти кабели трех- или четырехжильные из меди, изоляция из СПЭ, бронированные или без брони, оболочка из ПВХ П пониженной горючести, не распространяющие горение (марка ПвБВнг, ПвВнг).

Кабели на напряжение 1 и 6 кВ с медными трех- или четырехжильные для подводной прокладки имеют изоляцию из СПЭ, броня из стальных круглых оцинкованных проволок и защитный ПЭ шланг (марка ПвКШп).

Для подводной прокладки кабель на 35 кВ имеет более сложную конструкцию: круглая медная жила с полупроводящим экраном толщиной 1 мм; антиэмиссионный слой толщиной 0,4 мм; изоляция толщиной 7 мм из СПЭ, полупроводящий экран по изоляции толщиной 1,2 мм; экран из двух продольно наложенных медных поперечно гофрированных лент толщиной 0,25 мм, скрученных лавсановой лентой; оболочка из ПВХ П (марка ПвВ).

Маркировка кабелей выполняется по следующему принципу: медные жилы не маркируются; буква А – алюминиевая жила; вторая буква – материал изоляции (П – полиэтилен, В – ПВХ), при этом может быть указан вид ПЭ изоляции, например, Пс – самозатухающий, Пв – вулканизированный (сшитый). Следующая буква означает шланг из ПЭ (П) или ПВХП (В); алюминиевая обложка обозначается буквой А, стальная – СТ; следующие буква обозначают защитные покрытия: Б – ленточная броня с наружным защитным покровом, БГ – ленточная броня без наружного защитного покрова (голый). Например, кабель на 6 кВ может иметь марки АВВБ, ВВБ, АПВБГ и т.д.

1.2.4. Силовые кабели с резиновой изоляцией.

Кабели с резиновой изоляцией по электрическим параметрам значительно уступают кабелям с БПИ и пластмассовой изоляцией, но имеют существенное преимущество по гибкости. Со временем резиновая изоляция и оболочка из резины подвергаются старению, теряя эластичность и ухудшая электрические параметры. Старение резины происходит под воздействием эксплуатационных факторов: высокая температура, наличие озона, кислорода, ультрафиолета и т.д. Это происходит за счет окислительной деструкции каучука (присоединения кислорода по месту двойных связей). Из-за этих причин на практике максимальное напряжение кабелей с резиновой изоляцией

не превышает 35 кВ; за рубежом выпускают кабели с этиленпропиленовой резиной (ЭПР) на напряжение 66 и 110 кВ.

Основной причиной пробоя кабелей с резиновой изоляцией является разрушение резины озоном, который возникает из-за ионизации воздушных включений. Поэтому для создания кабелей высокого напряжения необходимо применять полупроводящие экраны по жиле и по изоляции и озоностойкие резины.

Перспективными резинами для кабелей резины являются на основе бутилкаучука, молекулы которого имеют линейную структуру и содержат малое количество двойных связей. Этиленпропиленовый каучук имеет также линейную структуру, при этом он не содержит двойных связей. Этим объясняется высокая озоностойкость резин на основе этих каучуков.

Силовые кабели с резиновой изоляцией можно разделить на кабели стационарной прокладки и гибкие кабели для передачи и распределения электроэнергии. Для неподвижной прокладки кабели работают при переменном напряжении 660 В или постоянном 1000 В, 3 и 6 кВ постоянного и переменного напряжения и 10 кВ постоянного напряжения.

Кабели имеют жилы из меди или алюминия круглой формы сечением от 1 до 500 мм². Поверх резиновой изоляции накладывается оболочка из свинца, ПВХП или шланговой резины; при необходимости накладываются защитные покровы обычной конструкции. Кабели на напряжение 600 В переменного тока (1000 В постоянного тока) могут быть одно-, двух-, трех- или четырехжильными; толщина изоляции в зависимости от напряжения и сечения жил составляет 1-2,5 мм. Двух- и трехжильные кабели сечением до 16 мм² включительно (исключая бронированные) могут быть выполнены плоскими.

Кабели на напряжение 3, 6 и 10 кВ изготавливаются только одножильными. В зависимости от сечения жил толщина изоляции на напряжение 3 кВ составляет 1,8-3,8 мм, на 6 кВ – 3-4 мм, на 10 кВ – 5 мм и выпускаются только следующих сечений 240, 300 и 400 мм². Толщина свинцовой оболочки равна 1-2 мм, из резины – 1,2-3,5 мм, из ПВХП – 1-2,6 мм. Длительная рабочая температура составляет для ЭПР – 90° С, для резины на основе битумкаучука – 65° С.

Кабели с резиновой изоляцией стационарной прокладки маркируют по тому же принципу, что рассмотренные кабели: резиновая изоляция обозначается буквой Р, оболочка их маслостойкой найритовой резины – Н. Например, кабель марки НБР – с медной жилой, резиновой изоляцией, найритовой оболочкой, ленточной броней и наружным защитным покровом; АВРБ – алюминиевая жила, резиновая изоляция, оболочка из ПВХП,

ленточная броня с наружным защитным покровом. Срок службы кабелей стационарной прокладки 20-25 лет.

Основную массу кабелей с резиновой изоляцией для нестационарной прокладки составляют гибкие кабели на напряжение до 660 В. Они предназначены для присоединения передвижных механизмов к электрическим сетям переменного или постоянного тока. Жилы кабелей медные, различной степени гибкости; число основных жил – 3; для заземления используются четырехжильные кабели (изоляция заземляющей жилы – желто-зеленого цвета). Отдельные марки кабелей имеют одну – две вспомогательные жилы. Сечение основных жил – от 0,75 до 150 мм², заземляющих – от 0,75 до 50 мм², вспомогательных – от 1,5 до 10 мм². Изолированные жилы 4-6-жильных кабелей скручиваются вокруг круглого или профильного резинового сердечника. Поверх скрученных жил накладывается резиновая оболочка, которая может быть маслостойкой и нераспространяющей горение. Кабели должны быть стойки к изгибам на роликах и растягивающим усилием (это указано в стандарте). Длительная рабочая температура кабелей составляет +75° С; морозостойкость составляет от –10 до –60° С в зависимости от применяемых материалов.

Имеется большая группа специализированных гибких кабелей: а) особо гибкие экранированные кабели на переменное напряжение до 660 В с изолированной нейтралью для присоединения шахтного бурильного электроинструмента; б) кабели для башенных кранов, работающих при переменном напряжении до 660 В; в) шахтные кабели для присоединения передвижных машин и механизмов на переменное напряжение 1140 В на основных жилах и 220 В на вспомогательных. На шахтных кабелях имеются гибкие экраны из электропроводящей резины.

Для присоединения экскаваторов и других передвижных механизмов к сети с изолированной нейтралью при переменном напряжении 6 кВ используются 4-х и 5-тижильные кабели, имеющие экраны по жиле и изоляции из электропроводящей резины. Толщина изоляции основных жил – 4 мм, вспомогательных – 2,0-2,5 мм, экранов – 0,4-0,6 мм. Напряжение зажигания частичных разрядов (ЧР) в изоляции – не менее 9 кВ, напряжение погасания ЧР – не менее 6 кВ. Кабели стойки к изгибам вокруг роликов диаметром 400-600 мм и растягивающим усилием 196 Н. Длительная допустимая температура составляет +(75–80)° С, морозостойкость –(40–60)° С; срок службы зависит от назначения, например, минимальный срок службы экскаваторных кабелей на напряжение 6 кВ составляет 3 года, при наличии кабелеприемных барабанов – 5 лет.

На переменное напряжение до 6/10 кВ выпускается гамма гибких кабелей общего назначения для присоединения передвижных машин,

механизмов и оборудования. Кабели различаются по степени гибкости жилы. Число основных жил 1–3, заземляющих 1–2, вспомогательных 1, 2, 3, 5, 7. Номинальное сечение основных жил от 0,75 до 150 мм². Сроки службы кабелей – от 1 до 6 лет.

1.2.5. Силовые кабели нераспространяющие горение и огнестойкие.

Объем и концентрация электрических кабелей в кабельных коммуникациях возрастают, что увеличивает риск пожара. По данным США ежегодный ущерб от пожаров, вызванных загоранием кабелей, составляет около 6 млрд. Долларов. Показатели пожарной безопасности кабелей определяется правильным выбором материалов изоляции и защитных покровов, а также зависят от конструктивного исполнения.

Для оценки пожарной безопасности кабелей используют следующие основные показатели:

а) нераспространение горения характеризует способность кабеля к самозатуханию после прекращения источника пламени; количественная оценка – длина поврежденного участка кабеля после прекращения горения;

б) дымообразование при горении кабеля характеризуется максимальной удельной оптической плотностью среды в камере при сгорании образца;

в) коррозионная активность продуктов газовой выделения приводит к разрушению электрооборудования в помещениях, увеличивая ущерб от пожара, количественная характеристика – количество выделения активных продуктов: HCl – хлористый водород, HBr – бромистый водород, SO₂ – диоксид серы и т.п.; г) токсичность продуктов газовой выделения – одна из причин несчастных случаев при пожарах, которая определяется выделением токсичных продуктов: HCN – цианистый водород, NH₃ – аммиак, SO₂ – диоксид серы, H₂S – сероводород, CO – оксид углерода и др.;

д) огнестойкость кабеля характеризуется сохранением его работоспособности при воздействии открытого пламени в течение установленного времени (от 15 минут до 3 ч.).

для полимерных материалов, применяемых для изоляции или шланга, установлены показатели пожарной безопасности: горючность, "кислородный индекс" (КИ), коэффициент дымообразования и токсичность продуктов горения.

Под горючностью понимают способность материала к горению (ГОСТ 21.1.044-84). Материалы разделяются на: негорючие – не способные гореть в воздухе; трудногорючие – способные возгораться в воздухе, но не способные гореть самостоятельно после удаления источника зажигания; горючие – способные самовозгораться и самостоятельно гореть после удаления источника зажигания. Существующие количественные показатели горючести

материалов часто не совпадают с показателями пожарной безопасности кабелей, поэтому не находят применения.

Наибольшее распространение получил КИ, который равен минимальному объему кислорода в кислородно-азотной смеси, при которой возможно устойчивое горение материала при испытании.

Практика показала, что все материалы с $КИ \leq 21$ являются горючими материалами и могут самостоятельно гореть на воздухе после удаления источника зажигания. В таблице 5. приведены значения КИ для материалов, применяемых для кабелей.

Таблица 5.

Значения КИ для материалов кабельного производства.

Материал	КИ
Полиэтилен	18
Полиэтилен самозатухающий	24-27
Поливинилхлоридный пластикат (ПВХП)	24
ПВХП пониженной горючности	32-40
ПВХ смола	45
Резина на основе бутилкаучука	16
Резина на основе хлоропренового каучука	26
Полиэтиленвинилацетат	52
Этиленпропиленовый каучук	18-22
Полиамид	25
Полиимид	36
Фторопласт-4	95-96
Фторопласт-4МБ	95
Фторопласт-2М	43-44
Фторопласт-40	30-31

Коэффициент дымообразования определяется фотометрическим способом ослабления освещенности при прохождении света через задымленное пространство и рассчитывается по формуле:

$$D = \frac{V}{L \cdot m} \ln \frac{E}{E_{\min}} [м^2 / кг] \quad (1)$$

где L – длина светового пути в задымленной среде, м; V – вместимость дымовой камеры, м³; m – масса испытуемого материала, кг; E, E_{min} – начальная и минимальная освещенность, соответственно, лк.

Наибольшее распространение в зарубежной практике нашел метод камеры NBS (Национальное бюро стандартов), при котором максимальная оптическая плотность дыма определяется по формуле:

$$D_{\max} = \frac{v}{AL} \lg \frac{100}{T_c}, \quad (2)$$

где A – площадь поверхности испытуемого образца, m^2 ; T_c – коэффициент пропускания светового потока, %.

По методу NBS коэффициент D – безразмерная величина, которая определяется для двух режимов: тления и пламенного горения материала (табл. 6).

Таблица 6.

Максимальная оптическая плотность дыма по методу NBS

Материал	D_{\max}	
	Тление	Пламенное горение
Полиэтилен	470	150
Полипропилен	470	150
Политетрафторэтилен (Ф-4)	0	55
ПВХП	272	525
Полиамид	320	269
Полиуретан пластифицированный	156	20
Резина	400-620	450-800
ПВХП с низким дымообразованием	–	256
Полиэтиленвинилацетат (ПЭВА)	–	128
ПЭВА с наполнением гидроксидом алюминия	–	80
Сшитый наполненный полиэтилен	–	65

В соответствии с рекомендациями МЭК коррозионная активность продуктов газовой выделения оценивается по содержанию HCl , HBr , SO_2 и HF , определяемому аналитическими методами в камере сгорания при нагревании образца до $800^\circ C$ в течение 20 мин.

По количеству выделяемых токсичных газов (CO , CO_2 , HCl , HCN , HBr , HF , SO_2 , NO) при нагревании материалов до температуры $800^\circ C$ определяется токсичность продуктов горения. На основании количественной оценки токсичных газов вычисляется условный показатель вредности (INC):

$$INC = \frac{100}{m} \sum \frac{M_i}{M_{di}} \quad (3)$$

и условный показатель токсичности (ИТС):

$$ИТС = \frac{100}{m} \sum \frac{M_i}{M_{ki}}, \quad (4)$$

где m – масса образца, г; M_i – масса выделенного i -го газа, мг; M_{di} – длительно допустимая концентрация i -го газа в течение 8 ч/сут, мг/м³; M_{ki} – критическая концентрация i -го газа, допускающая пребывание персонала в течение 30 мин. без биологических повреждений организма, мг/м³.

При выборе материалов для огнестойких кабелей и нераспространяющих горение стремятся к следующим значениям:

$INC \leq 100$; $ИТС \leq 5$. Значения показателей приведены в табл. 7.

Таблица 7.

Значение условных показателей вредности и токсичности полимерных материалов.

Материал	INC	ИТС
ПЭ изоляционный	100	3-5
ПВХП для оболочек	2000-3000	100-150
ПЭ хлорсульфинированный для оболочек	1000	50
Кремнийорганическая резина для оболочек	100	3
Политетрафторэтилен (Ф-4)	15000	2000

Основными материалами для изоляции и оболочек кабелей являются ПЭ, ПВХП и различные резины. Наименее горючим из этих материалов являются ПВХП (при горении выделяется HCl, что препятствует горению; при контакте с парами воды образуется соляная кислота HCl, обладающая сильными коррозионными свойствами; газообразный HCl отрицательно действует на человека). Высокое дымо- и газовыделение ограничивает применение ПВХП для огнестойких и не распространяющих горение кабелей. Стойкость ПВХП к действию пламени можно увеличить введением антипиренов, фосфатных пластификаторов и специальных наполнителей.

ПЭ обладает повышенной горючестью, поэтому для негорючих кабелей применяют композиции самозатухающего ПЭ с введением антипиренов (смесь хлорированного парафина и триоксида сурьмы). Преимущества самозатухающего ПЭ перед ПВХП заключаются в пониженном содержании дымо- и газовыделения и низких показателях вредности и токсичности. Шланговые рецептуры самозатухающего ПЭ известны под названием касполон.

Из традиционных резин наименьшей горючестью обладают резины на основе полихлоропренового каучука, используемые для оболочек кабелей. Повышенной стойкостью к горению обладают резины на основе кремнийорганических каучуков и каучукоподобных полимеров – хлорированный или хлорсульфированный ПЭ (Hypolon).

Фторопласты обладают высокой огнестойкостью, имеют высокие значения КИ и низкие дымо- и газовыделения. Однако при температурах выше 300° С они выделяют высокотоксичные продукты, которые поражающе действуют на человека и выводят из строя электрооборудование.

Кабели с БПИ на напряжение 1-10 кВ марок ААБнлГ и ЦААБнГ не распространяют горение при испытаниях в пучках и выдерживают воздействие открытого пламени в течение 20 мин. при испытании на огнестойкость.

Кабели с пластмассовой изоляцией не распространяющие горение (индекс “нг” в маркировке) выпускаются с медной или алюминиевой жилой, ПВХ изоляцией и оболочкой из ПВХП пониженной горючести, марки ВВВнг и АВВнг, которые используются преимущественно на АЭС.

Для пожаростойких кабелей предпочтительно использовать в качестве изоляции полимерные композиции, не выделяющие при горении галогеноводородов – это СПЭ и его композиции со специальными типами минеральных наполнителей и антипиренов.

В качестве дополнительных мер по огнезащите используют ряд мастик и красок, наносимых на поверхность проложенных кабелей методом распыления или кистью; толщина покрытий около 1,5 мм. При этом токовые нагрузки кабелей снижаются на 3-7 %.

Испытание кабелей на нераспространение горения (публикация МЭК 332-1) основано на поджигании газовой горелкой вертикально расположенного одиночного кабеля длиной 600 мм. Температура пламени выбирается так, чтобы медная проволока диаметром около 0,7 мм расплавилась в пламени примерно за 5 с. Время воздействия пламени, с, зависит от массы образца кабеля, m , можно рассчитывать по формуле:

$$\tau = 60 + m / 25. \quad (5)$$

После прекращения воздействия пламени кабель считается не распространяющим горение, если длина поврежденной части не доходит до верхнего конца образца на 50 мм.

Более жесткие условия испытаний кабелей, проложенных пучком, на нераспространение горения (публикация МЭК 332-3). Несколько отрезков кабелей длиной $(3,5 \pm 0,025)$ м закрепляются вертикально на лестничном каркасе; общая ширина закрепленных образцов не превышает 300 мм. Кабели с жилами меньше 35 мм² закрепляются без зазора, а с жилами 35 мм² и более закрепляются с зазором, равным половине наружного диаметра, но не более

20 мм. Кабели подвергаются воздействию пламени газовой горелки 40 мин. (категория А и В) или 20 мин. (категории С). После прекращения самостоятельного горения и тления с кабелей удаляется копоть и измеряется длина поврежденной части. Кабели выдержали испытание, если обугленная или поврежденная пламенем часть образца не превышает 2,5 м.

Количество кабелей для испытаний выбирается в зависимости от категории испытания и количества горючей массы материалов в конструкции кабеля. Для категории А объем горючей массы в пучке составляет 7 л/м, для категории В – 3,5 л/м, для категории С – 1,5 л/м.

Для оценки огнестойкости кабелей в мировой практике наиболее широко используется рекомендация МЭК (Публикация МЭК 331). Схема установки для проведения испытаний приведена на рис. 8. Режим испытаний образцов на огнестойкость и основные свойства изоляционных лент, разработанных холдинговой компанией “Элинар” (Московская обл., г. Наро-Фоминск) приведены в табл. 8 и 9.

Во ВНИИКП разработана методика испытаний кабелей на огнестойкость, которая отличается от стандарта МЭК. Для уменьшения продольного отвода тепла из зоны воздействия пламени длина образца уменьшается с 1200 до 900 мм, при этом длина образца в зоне горелки остается без изменений – 600 мм. Во время воздействия пламени в течение 30 мин. снижается зависимость тока утечки через изоляцию от времени, что дает дополнительную информацию об огнестойкости кабеля.

В отличие от испытаний по рекомендации Публикации МЭК 331 в методике ВНИИКП предусмотрены три возможных режима испытаний на огнестойкость: категория X – температура пламени $(650 \pm 20)^{\circ} \text{C}$; категория Y – $(750 \pm 20)^{\circ} \text{C}$; категория Z – $(900 \pm)^{\circ} \text{C}$.

1.2.6. Силовые кабели высокого напряжения с бумажной изоляцией.

Кабели с БПИ (пропитка вязким маслосиликоновым составом) имеют в изоляции воздушные включения, поэтому они имеют невысокую электрическую прочность; рабочая напряженность составляет $E_p=3-4$ кВ/мм, поэтому они применяются на напряжения до 35 кВ включительно.

Для увеличения электрической прочности пропитанной бумажной изоляции необходимо: а) исключить воздушные включения и их появление – маслосиликоновые кабели (МНК); б) повысить электрическую прочность включений – увеличить в них давление, или заполнить включения элегазом SF₆, имеющего высокую электрическую прочность – газонаполненные кабели (ГНК).

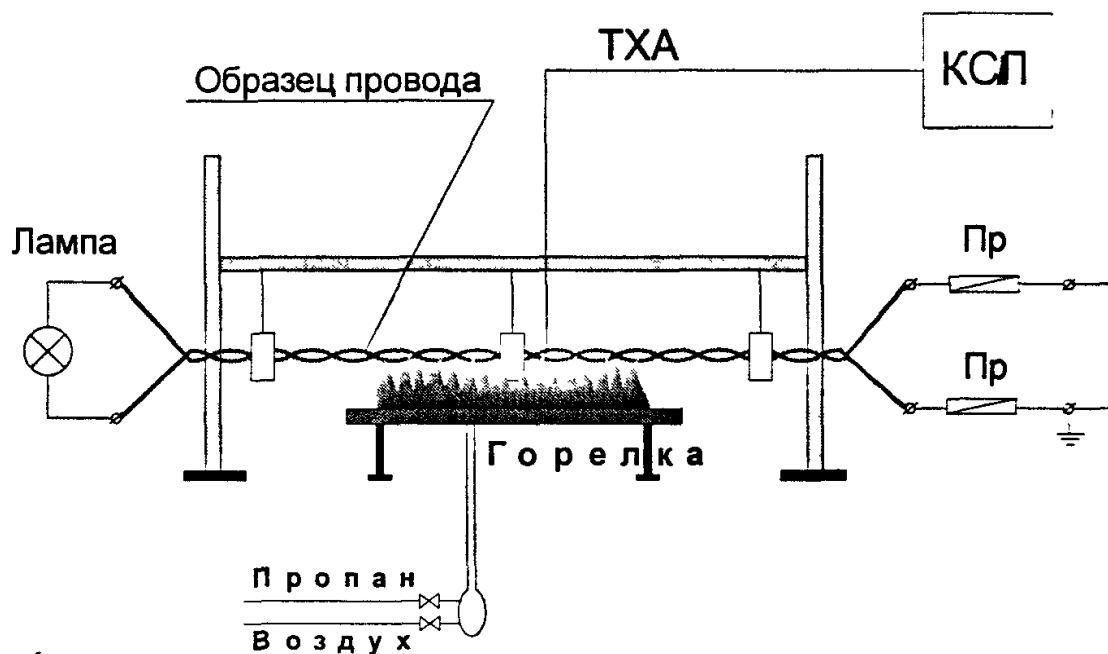


Рис. 8. Схема испытания изолированной жилы на огнестойкость по МЭК 3311.
Огневое поле: длина 600 мм, ширина 15 мм.

Таблица 8.

Изменение пробивного напряжения изоляции провода после испытания на огнестойкость.

Образец	Режим испытаний на огнестойкость			Значение пробивного напряжения, кВ		
				U _{исх} =5,8	U _{исх} =9,2	U _{исх} =14,8
	T, °C	τ исп., мин.	U исп., В	Элмикатекс 515 с 50% перекрытием	Элмикатекс 525 с 50% перекрытием	Элмикатекс 525 с 75% перекрытием
1	750	180	400	4.0	7.5	—
2	750	180	400	4.5	8.0	—
3	750	180	400	4.0	8.0	—
1	750	180	1000	4.0	7.0	13.5
2	750	180	1000	3.5	7.5	11.5
3	750	180	1000	4.0	8.0	—
1	900	180	400	3.5	7.0	—
2	900	180	400	3,5	6,5	8,0

Основные свойства лент для пожаробезопасных кабелей

Наименование показателей	Един. измер.	Элмикатекс 525 на флогопите			Элмикатекс 515 на мусковите
Толщина	мм	0,14±0,015	0,12±0,015	0,10±0,015	0,12±0,03
Поверхностная плотность	г/м ²	220±10	180±10	138±8	130±10
Слюдяная бумага	г/м ²	160±10	127±10	91±8	75±4
Стеклоткань	г/м ²	30±3	30±3	30±3	24±3
Связующее	%	14±2	13±2	13±2	25±5
Прочность на разрыв	Н/мм	>8	>8	>8	>8
Пробивное напряжение	В	2000	1800	1400	1300
Содержание галогенов	%	0	0	0	0
Содержание асбеста	%	0	0	0	0

Современные конструкции МНК дают возможность строить кабельные линии высокой надежности, поэтому они нашли широкое применение во всех странах мира. Единичные случаи выхода из строя МНК объясняются различными неполадками монтажно-эксплуатационного характера или технологическими ошибками. Однако эти кабели также имеют недостатки. Основные из них следующие:

1) длительный сушильно-пропиточный процесс, требующий достаточно сложного оборудования и препятствующий созданию непрерывности технологического процесса;

2) относительная диэлектрическая проницаемость изоляции (примерно 3,6) за счет наличия целлюлозы, которая приводит к значительным величинам емкостных токов; в настоящее время ведутся работы по уменьшению количества целлюлозы (частичной замене ее на синтетические материалы);

3) величина тангенса угла диэлектрических потерь примерно на порядок выше, чем у полиэтилена, что вызывает значительное увеличение потерь в изоляции; если для напряжений 110 и 220 кВ они допустимы, то для более высоких напряжений приходится применять искусственное охлаждение или принимать меры к снижению потерь в изоляции.

Имеются два типа конструкций: кабели низкого давления с центральным каналом для масла типа МНСК, с давлением масла, не превышающим длительно 0,3 МПа и кратковременно 0,6 МПа, и кабели высокого давления в стальном трубопроводе типа МВДТ с номинальным давлением 1,5 МПа (рабочее давление 1,3-1,6 МПа).

Маслонаполненные кабели низкого давления.

Возможность образования газовых включений при изготовлении и эксплуатации исключается, т.к. для пропитки применяются маловязкие масла, а самапропитка исключает появление пустот в изоляции. При эксплуатации пропитка находится под избыточным давлением, которое поддерживается автоматически.

В России освоен выпуск таких кабелей на напряжения 110 и 220 кВ, хотя они могут быть изготовлены на сверхвысокие напряжения (например, во Франции и в Италии изготовлены кабели на 750 кВ).

На рис. 9. представлено сечение МНК. Жила имеет в центре канал, по которому передается давление масла и его перемещение при изменении температуры кабеля. Диаметр канала для кабелей на напряжение 110 и 220 кВ составляет 12-14 мм, на более высокие напряжения – от 18 до 40 мм. Канал внутри жилы образуется с помощью Z-образных проволок (рис. 9, 11), поверх которых накладываются сегментные проволоки, дающие гладкую поверхность жилы, или круглые проволоки (рис. 1.11).

Находит применение и плоская медная (или нержавеющей сталь) спираль, поверх которой накладываются круглые проволоки (рис. 10). Для жил сечением свыше 600 мм² целесообразно применять секционированную жилу, которая скручивается из 4-х или 6-ти изолированных друг от друга сегментов, что снижает влияние поверхностного эффекта и эффекта близости.

Увеличение пропускных способностей кабелей привело к созданию жил сечением 2500 мм² и более (Англия, напряжение 400 кВ; Япония, 500 кВ). При этом возрастает поверхностный эффект и появляются сложности отвода тепла. Исследования показали, что в диапазоне сечений 2000-3000 мм² более эффективны сегментные жилы из эмалированных проволок или с послойно изолированными сегментами.

По поверхности жилы и изоляции накладываются экраны из полупроводящей бумаги. Для экранирования можно использовать металлизированную бумагу, медную или алюминиевую фольгу, однако полупроводящая (сажевая) бумага имеет дополнительно положительный эффект – обладает адсорбционными свойствами, способствующими стабилизации электрических свойств масла. Рекомендуется выбирать удельное объемное сопротивление полупроводящего слоя бумажных экранов на уровне порядка 10⁵-10⁷ Ом·см. В этом случае отсутствует заметное возрастание tgδ изоляции и диэлектрических потерь в экранах.

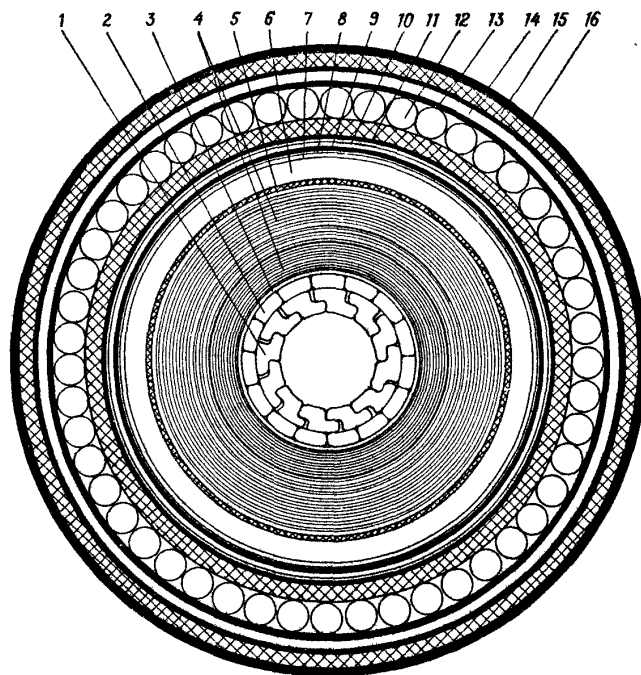


Рис. 9. Маслонаполненный кабель низкого давления с центральным масляным каналом марки МНСК 1– зетобразные проволоки; 2 – сегментные проволоки, 3 – экран по ТПЖ, 4 – изоляция из кабельной бумаги; 5 - экран по изоляции; 6 – свинцовая оболочка; упрочняющий покров: 7 - ленты из ПВХ пластиката; 8 –ленты из твердотянутой меди; подушка: 9 - битумный состав; 10 - ленты полиэталентерефталатные и из крепированной битуминизированной бумаги; 11– битумный состав и предварительно пропитанная кабельная пряжа; 12 – броня из круглых стальных оцинкованных проволок; наружный покров: 13 – битумный состав; 14 - ленты полиэтилентерефталатные и из крепированной битуминизированной бумаги; 15 - битумный состав и предварительно пропитанная кабельная пряжа; 16 – битумный состав и меловое покрытие.

Изоляция кабелей состоит из лент кабельной бумаги, пропитанных маловязким дегазированным минеральным (МН-4) или синтетическим на основе додецилбензолов, алкилбензолов и. т.п.) маслом. Изоляция кабелей изготавливается из бумаг разной плотности (разной ϵ_r – градирующая изоляция; вначале идут бумаги большей плотности), что повышает коэффициент использования изоляции и уменьшает ее толщину.

Тенденция к повышению напряжения при передаче электроэнергии выдвигает требования к изоляции, которым не всегда может соответствовать бумага из сульфатной целлюлозы, пропитанной маслом.

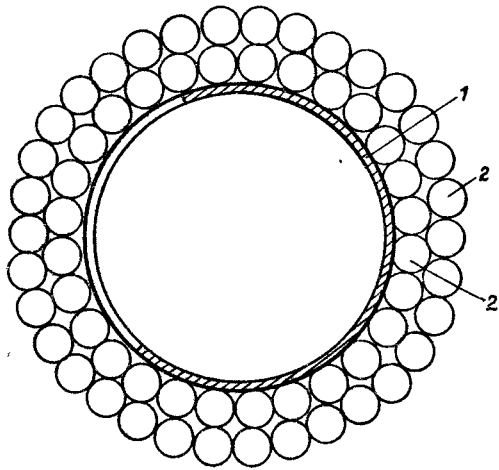


Рис. 10. Токопроводящая жила маслонаполненного кабеля низкого давления на напряжение 220 кВ с центральным масляным каналом: 1 – спираль открытая, из плоской проволоки; 2 – круглые проволоки, медные.

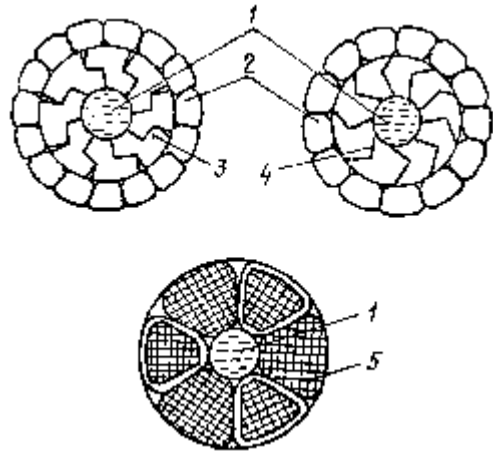


Рис. 11. Токопроводящая жила маслонаполненного кабеля низкого давления с масляным каналом внутри: 1 – масляный канал; 2 – сегментные проволоки; 3 – Z-образные проволоки; 4 – проволоки типа "ласточкин хвост"; 5 – секционированная жила.

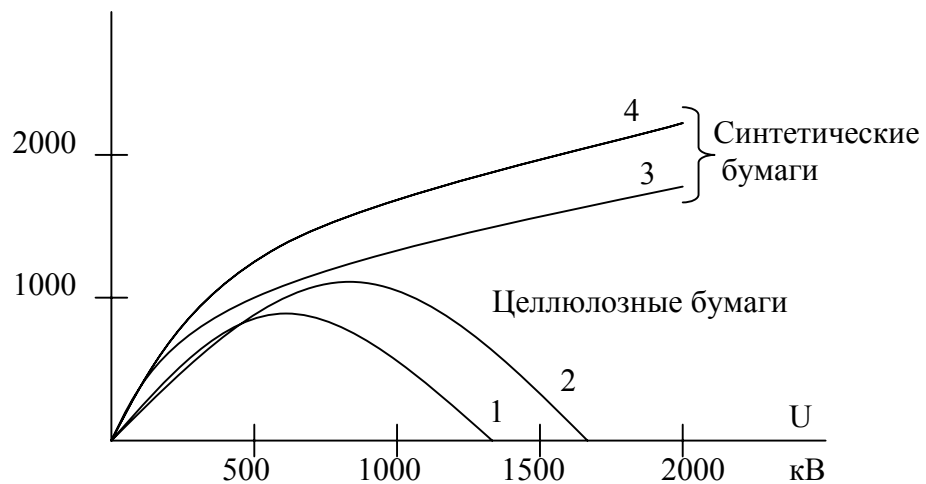


Рис. 12. Зависимость пропускной способности P МНК от рабочего напряжения (сечение жилы 1200 мм^2 , температура жилы 80°C):

$$1 - \epsilon_r \cdot \text{tg} \delta = 7 \cdot 10^{-3}; 2 - 5 \cdot 10^{-3}; 3 - 3 \cdot 10^{-3}; 4 - 1 \cdot 10^{-3}.$$

Изоляция из бумаг марок КВУ, КВ, КВМУ и КВМ имеют в исходном состоянии $\text{tg} \delta = 0,0025$. При этом диэлектрические потери кабелей на напряжение 500 кВ могут достигать 200 % потерь в жиле и более.

Диэлектрические потери в кабеле пропорциональны $\epsilon_r \cdot \operatorname{tg} \delta$ (рис. 12). Традиционная бумажно-масляная изоляция (БМИ) имеет значения $\epsilon_r \cdot \operatorname{tg} \delta = 6 \cdot 10^{-3}$, поэтому ее нельзя использовать для изоляции кабелей на напряжения свыше 500 кВ. Наиболее перспективные направления разработки новых типов изоляции для высоковольтных кабелей: а) разработка новых видов бумаг из синтетических волокон; б) создание многослойной комбинированной бумаги в виде чередующихся слоев бумаги и синтетической пленки.

Большое распространение получила бумага из синтетических волокон Тенах (синтетическая бумага) была разработана примерно 20 лет назад. Новые синтетические бумаги разработаны в Японии: PAP – из полиэфирного волокна и связующего на основе поликарбоната; SSP – на основе полиэфирного волокна и связующего из полифениленоксида. В Англии разработан слоистый материал марки PPL – полипропеленовая пленка, проложенная между двумя слоями целлюлозной бумаги. Аналогичный материал разработан фирмой Sumitomo Electric Ind (Япония) для разработки целой серии синтетических бумаг марки PPLP (наилучшие пропиточные свойства в додецилбензоле показала бумага с содержанием полипропилена 40 % по объему). Слоистая бумага (фирма Hitachi Cable, Япония) FER состоит из пленки из фтористого этиленпропиленсополимера толщиной 40 или 100 мкм, размещенной между двумя слоями целлюлозной конденсаторной бумаги толщиной 25 или 40 мкм. Основные параметры изоляционных бумаг приведены в табл. 10.

Как показала практика эксплуатации наиболее экономичными являются кабели с давлением масла 0,024-0,3 МПа в свинцовой оболочке и 0,024-0,5 МПа в алюминиевой оболочке. Толщина оболочки выбирается в пределах от 2,5 до 4 мм. Иногда конструкции кабелей на напряжение свыше 220 кВ предусматривают два масляных канала: в центре жилы и под металлической оболочкой, которая на внутренней стороне имеет продольные канавки. Свинцовые оболочки имеют упрочняющие покровы из синтетических лент и двух лент из меди; алюминиевые оболочки упрочняющих покровов не имеют. Защитные покровы поверх свинцовой оболочки состоят из чередующихся слоев битума, лент из ПВХП, лент предварительно пропитанной кабельной бумаги, кабельной пряжи и мелового покрытия; могут быть наложены стальные оцинкованные проволоки диаметром 1,4, 4 или 6 мм. Поверх алюминиевой оболочки накладываются защитные покровы повышенной влагостойкости: сплошной шланг из ПЭ или ПВХП, который накладывается поверх последовательных слоев битума и синтетических лент алюминиевой оболочки.

Таблица 10.

Основные параметры изоляционных бумаг.

Параметр	Целлюл. бумага с низкими потерями	Tenax	PAP	SSP	FEP	PPL	PPLP
Толщина, мм	0,125	0,12	0,125	0,11	0,115	0,1-0,12	0,125- 0,155
Плотность сухой бумаги, кг/м ³	720	840	750	640	1400	900	880
Прочность при разрыве в продольном направлении, 10 ⁷ Н/м ²	5,1	3,4	6,9	5,2	9,3	7,6	6,0
Удлинение при разрыве, %	2,8	3,2	2,5	2,6	3,0	2,7	2,6
Диэлектрическая проницаемость	3,3	2,3	2,65	2,5	2,7	2,7	2,7
tgδ·10 ⁻³ при 80° С	4,9	0,7	1,2	1	1,9	2,16	2,16
Электрическая прочность, кВ/мм: при переменном напряжении.....	40	45	-	45	50	55	135-150
При импульсивном напряжении	125	115	100	95	140	150	250

Примечание: E_{пр} бумаги марки PPLP определена на листовом материале.

Отечественная промышленность выпускает МНК низкого давления следующих марок:

МНС – в свинцовой оболочке с упрочняющими и защитными покровами:

МНСК – то же, но сослоем оцинкованных круглых стальных проволок;

МНСШ_в – то же, но защитные покровы в виде шланга сделаны из ПВХП;

МНАШ_в – в алюминиевой оболочке и шланга из ПВХП;

МНА_гШ_в – то же, но алюминиевая оболочка гофрированная;

МНАШ_{ву} и МНА_гШ_{ву} – то же, но с усиленным защитным слоем под шлангом.

Номинальная толщина изоляции дана в табл. 11.

Таблица 11.

Номинальная толщина изоляции МНК низкого давления

Сечение жилы, мм ²	Диаметр центрального масляного канала, мм	Толщина изоляции, мм, при напряжении, кВ		
		110	150	220
120	9	11,0	-	-
150	12	11,0	-	-
185	12	10,6	-	-
240	12	10,6	14,3	-
300	12	10,0	14,3	20,8
400	12	9,8	13,7	20,0
500	12	9,8	13	18,8
625	12	9,6	13	18
800	14	9,6	13	18

Жилы кабеля скручиваются из медных луженых проволок, т.к. контакт масла с медью ускоряет термическое старение масла. Толщина свинцовой оболочки составляет 3-3,6 мм; толщина алюминиевой оболочки для всех сечений – 2,5 мм, при этом с диаметром под оболочкой свыше 45 мм оболочка изготавливается гофрированной с формой синусоидальной или S-образной. Защитные покровы не отличаются от покровов кабелей низкого напряжения. Пример маркировки кабеля: МНА_гШ_{ву} 1х1500–220 – это МНК низкого давления в гофрированной алюминиевой оболочке, в шланге из ПВХП с усиленным защитным покровом, жила сечением 500 мм², номинальное напряжение 220 кВ.

За рубежом применяют трехжильные МНК, чаще плоской формы на напряжение 88 и 130 кВ в одной общей свинцовой оболочке. Упрочняющие покровы содержат две рифленые полосы из бронзы на плоских сторонах свинцовой оболочки. Полосы стягиваются двумя медными проволоками и оказывают давление на свинцовую оболочку, поэтому внутри всегда

поддерживается избыточное давление масла не менее 0,2 МПа. Плоский кабель не нуждается в подпитке, поэтому его прокладка возможна в больших строительных длинах (например, на подводных трассах).

Маслонаполненные кабели высокого напряжения (в стальных трубопроводах). МНК высокого давления в стальном трубопроводе (МВДТ) нашли большое распространение в отечественной электроэнергетике. Эти кабели имеют преимущества перед МНК низкого давления: а) электрическая прочность выше, т.к. изоляция находится под давлением 1,5 МПа (15 атм); трубопровод заполняется более вязким маслом (типа С-220 или 5R-A), имеющим большую импульсную электрическую прочность; б) стальной трубопровод имеет надежную защиту от механических повреждений, поэтому кабели типа МВДТ являются исключительно надежными (рис. 13).

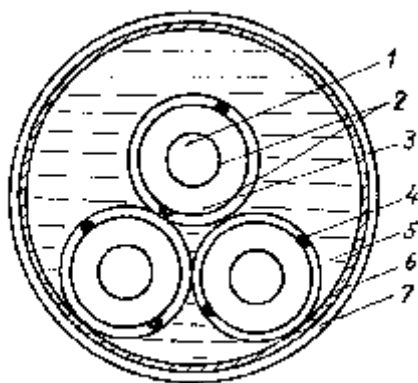


Рис. 13. Маслонаполненный кабель высокого давления типа МВДТ: 1 – токопроводящая жила; 2 – экран по поверхности жилы и изоляции соответственно; 3 – бумажная изоляция, пропитанная маслом; 4 – проволоки скольжения; 5 – масло большой вязкости типа С—220; 6 – стальной трубопровод; 7 – антикоррозионный покров.

Однако монтаж линий сложнее, а стоимость выше, чем линий с МНК низкого давления. Жилы имеют круглую форму и скручиваются из медных луженых проволок по правилу простой правильной геометрической скрутки(1+6+12+18+и т.д.). Жилы сечением 700 мм² и выше скручиваются из четырех секторов, два из которых изолированы бумажными лентами. Поверх жилы и изоляции накладываются экраны из полупроводящих бумаг. Изоляция кабеля имеет двухслойное градирование. Поверх бумажного экрана по изоляции накладывается экран из двух медных перфорированных лент, которые создают радиальное поле в изоляции каждой фазы. Для снижения

потерь в экране металлические ленты разделены полупроводящей бумагой. Для обеспечения затягивания трех фаз в трубопровод поверх медного экрана накладываются с шагом 100-300 мм две-три медные (не отожженные) или бронзовые полукруглые проволоки скольжения.

На место монтажа отдельные жилы кабеля доставляются в специальных герметичных контейнерах, заполненных маслом (в них производится сушка и пропитка изолированных фаз), или значительно реже во временной свинцовой оболочке. Она предохраняет изоляцию кабеля от увлажнения и загрязнения во время хранения и транспортировки. Перед затягиванием в трубопровод свинцовая оболочка снимается. Трубопровод сваривается из отдельных стальных бесшовных труб длиной 10-12 м. Внутренняя и наружная поверхность трубопровода тщательно очищается и покрывается антикоррозионным составом. При прокладке в земле толщина наружного антикоррозионного слоя составляет 10 мм. Кабель для транспортировки в контейнере с маслом имеет марку МВДТк. Такие кабели можно прокладывать в туннелях, в земле и под водой. Сечения жил и толщина изоляции приведены в табл. 12.

Оптимальное значение внутреннего диаметра трубопровода составляет $(2,7-2,8) d_k$ (d_k – наружный диаметр одной фазы кабеля). При увеличении диаметра трубопровода до $3 d_k$ может произойти заклинивание фаз кабеля при затягивании их в трубопровод. При изменении температуры кабеля из-за изменения температуры происходит значительное изменение его длины, поэтому его укладка производится со свободными изгибами ("змейкой"), которая компенсирует изменение длины кабеля в трубопроводе. В отечественной практике в основном применяются стальные катаные трубы с внутренним диаметром 219 или 273 мм с толщиной стенки 10 мм.

Газонаполненные кабели (ГНК). Чистый сухой газ под давлением 0,7-0,3 МПа подводится в ГНК. В качестве газа применяется азот; наиболее перспективным является смесь азота с элегазом (SF_6). Конструкции ГНК приведены на рис. 14. Наиболее распространенными являются одножильные ГНК (рис. 14в), когда газ непосредственно входит в обедненную БПИ (зазоры между лентами бумаги, пространство между проволоками жилы). Трехжильные ГНК (рис. 14б) имеют секторные жилы, изолированные обедненной БПИ, газ входит в изоляцию. Газопроводящие каналы расположены по периферии под свинцовой или алюминиевой оболочкой. Энергетическая прочность трехжильных кабелей ниже одножильных, поэтому применяются на напряжение не выше 66 кВ.

Таблица 12.

Номинальная толщина изоляции кабелей типа МВДТ.

Номинальное сечение жилы, мм ²	Напряжение, кВ				
	110	220	330	380	500
120	12,4	-	-	-	-
150	11,8	-	-	-	-
185	11,3	-	-	-	-
240	10,7	-	-	-	-
270	10,5	-	-	-	-
300	10,5	20,7	-	-	-
400	10	19,1	25	28	-
500	9,8	18,1	24	26	-
550	9,8	18,1	24	26	31
625	9,6	17,5	23	25	30
700	9,6	17,5	23	25	30

На рис. 14, а показана конструкция кабеля в трубопроводе с газом под давлением. Отдельные фазы кабеля имеют БПИ (маслоканифольный состав), а сверху покрыты пластмассовой оболочкой. Давление газа на изоляцию передается через пластмассовую оболочку, которая играет роль мембраны; при этом газ не входит в изоляцию. Эти кабели наряду с МНК типа МВДТ широко распространены в США, ФРГ и Японии.

Электрическая прочность ГНК значительно ниже, чем МНК. Электрические параметры этих кабелей нестабильны, т.к. сильно зависят от давления газа и температуры, поэтому в отечественных энергосистемах практически не применяются.

В настоящее время существуют три основные конструкции ГИК переменного тока: а) пофазно экранированная с жесткими токоведущими элементами, т.е. каждая фаза в отдельной трубе; б) трехфазная конструкция с жесткими токоведущими элементами в общем экране; в) пофазно экранированным гибким токоведущим элементом; один из возможных вариантов конструкции показан на рис. 15.

Наиболее разработана первая конструкция. В Ленэнерго в 1974 году введен такой вариант конструкции ГИК на 220 кВ. Второй тип имеет преимущества в компактности конструкции, особенно это важно для городской территории. Общая оболочка этого варианта примерно на 80 % меньше трех оболочек пофазно экранированного ГИК, что уменьшает ширину траншеи в 2,5-3 раза. Предполагается использовать второй вариант для передачи мощности порядка 1,5 ГВА; для больших мощностей (более высоких напряжений) габариты

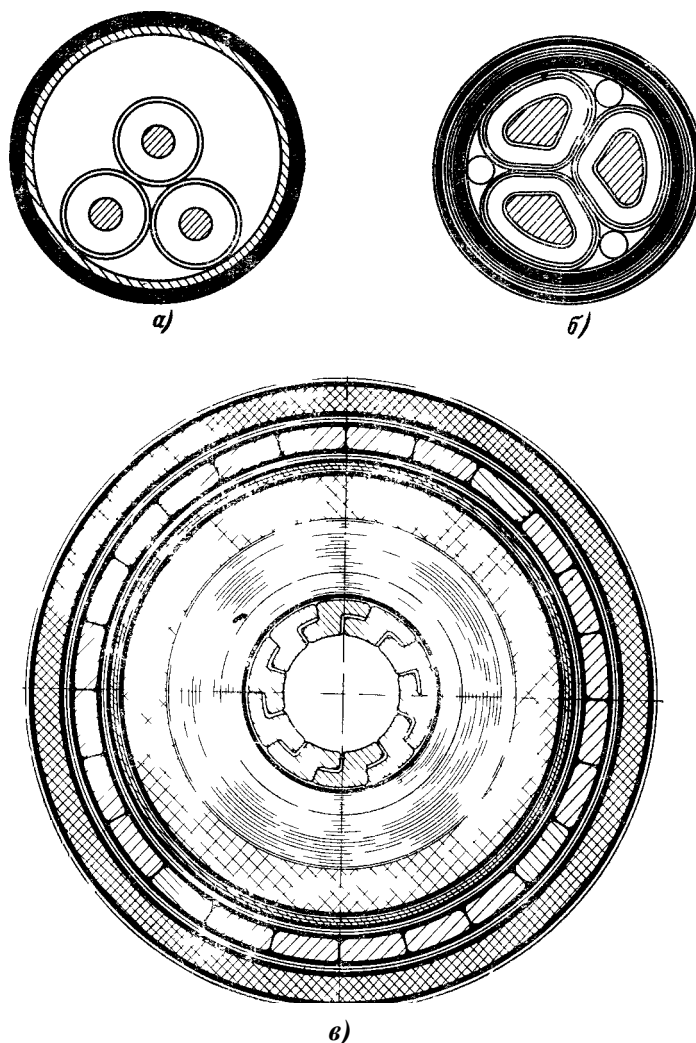


Рис. 14. Газонаполненные кабели. *а)* – кабель в стальной трубе с газом под давлением; *б)* – трехжильный; *в)* – одножильный.

сильно увеличиваются, тогда становится более целесообразной конструкция с пофазно экранированными жилами.

Третий вариант ГИК с гибкими элементами имеет существенные преимущества перед жесткими, которые создают большие сложности при монтаже линии в полевых условиях. Гибкие ГИК можно изготавливать секциями длиной 100-200 м, их удобнее транспортировать и примерно на порядок меньше становится число соединений, габаритные размеры тоже не велики. Так, для конструкции с трехлучевой распоркой из поликарбоната с толщиной стенки 5 мм и шириной ребра 25 или 33 мм (рис. 15б) для номинального напряжения 275 кВ диаметр по оболочке составляет 127 мм при давлении элегаза порядка 1,35 МПа.

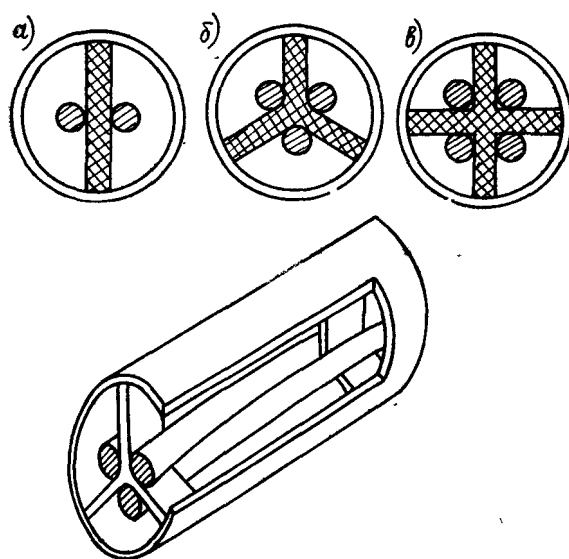


Рис. 15. Конструкция гибкого кабеля с расщепленной фазой на два — *a)*, три — *б)* четыре — *в)* проводника с элегазовой изоляцией и продольными распорками (Великобритания).

В настоящее время ГИК находятся в опытной эксплуатации в США, Японии, Германии, Великобритании и других странах. ГИК в одножильном исполнении разработаны на напряжения 345 кВ (в том числе гибкой конструкции, наружный диаметр 390 мм, пропускная способность порядка $1000 \text{ МВ} \cdot \text{А} = 1 \text{ ГВ} \cdot \text{А}$) 400 и 500 кВ (пропускная способность 5 ГВ·А); ведутся разработки конструкции на 800 и 1200 кВ переменного напряжения (пропускная способность порядка 10 ГВ·А).

Кабели высокого напряжения постоянного тока (КПТ). Линии электропередач (ЛЭП) постоянного тока (ЛЭП ПТ) кабельные используются совместно с воздушными. ЛЭП ПТ имеют ряд существующих преимуществ перед ЛЭП переменного тока: 1) они существенно дешевле, т.к. используется только два провода (биполярная передача) вместо трех при переменном токе. В случае аварийной ситуации с одним проводом можно использовать второй провод и землю (униполярная передача), при этом передается половина мощности; 2) изоляция КПТ работает в легких условиях, т.к. практически отсутствуют частичные разряды, электрическая прочность изоляции выше, поэтому пропускная способность КПТ в 2-4 раза выше; 3) при использовании постоянного тока отпадает само понятие критической длины кабеля; 4) две несвязные энергосистемы, работающие несинхронно как с разными частотами

(50 и 60 Гц), так и с одинаковой частотой, но с различными требованиями к точности ее поддержания, можно связать ЛЭП ПТ.

В мире действует всего примерно 19 ЛЭП ПТ и 5 вставок постоянного тока, при этом 10 ЛЭП ПТ являются либо полностью, либо частично кабельными, общая протяженность воздушных и кабельных ЛЭП ПТ составляет примерно 8,5 тыс. км, пропускная способность составляет примерно 35 ГВт (1995 г. СИГРЭ). В будущем ЛЭП ПТ отводится сравнительно узкая область использования: пересечение водных преград; магистральные линии без промежуточных отборов мощности (транзитная передача); осуществление связи между энергосистемами с разными частотами; межсистемные связи между крупными объединенными энергосистемами страны или разных стран.

Несколько ЛЭП и вставок ПТ находятся на разных стадиях строительства или проектирования. Необходимо отметить спроектированную в нашей стране уникальную по передаваемой мощности (6 ГВт) и энергии и (42 млрд. кВт·ч в год), номинальному напряжению (1500 кВ) и длине (2400 км) ЛЭП ПТ Экибастуз-Центр. При этом, несмотря на очень большую длину ЛЭП, обеспечиваются небольшие потери (около 6 %); суммарные потери на двух преобразовательных подстанциях составляют около 4 %. Передаваемая по линии энергия способна уменьшить ежегодные затраты органического топлива в Европейской части страны на 12-13 млн. т у.т.

Некоторые проблемы ЛЭП ПТ: 1) главная – создание достаточно совершенных вентиляей; высоковольтные тиристоры имеют рабочее напряжение до 3-4 кВ, поэтому требуется последовательное соединение сотен тиристоров, а для передачи больших мощностей – параллельное соединение цепочек тиристоров; необходимо обеспечить равномерное деление напряжения между тиристорами и одновременность их открытия и закрытия; 2) сложная проблема автоматического управления преобразователями: необходимо на каждый вентиль ежепериодно в строго определенные моменты подавать управляющие импульсы; 3) проблема компенсации реактивной мощности, которую в рабочих режимах преобразователи потребляют, составляющую до 50 % активной мощности; ее необходимо покрывать от генераторов, компенсаторов или конденсаторных батарей; 4) отбор мощности и построение даже простейших разветвительных сетей пока не осуществлен; для промежуточного отбора мощности требуется сооружение дополнительных преобразовательных подстанций, самых дорогих элементов ЛЭП ПТ; главная проблема заключается в создании особого выключателя для включения и отключения отдельных ответвлений на стороне ПТ без перерыва в работе остальных частей ЛЭП. В отличие от выключателей переменного тока, у которых ток прекращается в момент его естественного перехода через нуль,

выключатели ПТ при оперативных отключениях должны разрывать полный рабочий ток, а при авариях – ток, во много раз превышающий номинальное значение.

Главные недостатки ЛЭП ПТ – высокая стоимость преобразовательных подстанций, сложность преобразовательной техники и нерешенность проблемы создания разветвленных сетей. Пока не одна из действующих ЛЭП ПТ не имеет промежуточных отборов мощности.

Условия работы электрической изоляции КПП существенно облегчены по сравнению с кабелями переменного тока, поэтому толщина изоляции КПП при одном и том же напряжении значительно меньше. Среди известных конструкций КПП можно выделить следующие:

- 1) кабели с бумажной изоляцией, пропитанной вязким составом – БПИ (рис. 16);
- 2) маслонаполненные кабели – МНК (рис. 17);
- 3) газонаполненные кабели – ГНК с изоляцией из предварительно пропитанных бумажных лент;
- 4) кабели с пластмассовой (ПЭ) изоляцией.

Кабели с БПИ имеют простую конструкцию, не требуют подпитки (не ограничены в длине) и являются наиболее дешевыми. Но они не применяются при напряжениях выше 300 кВ, при этом рабочая напряженность поля достигает $E_p=30$ кВ/мм, что является предельной для такого типа кабелей.

МНК могут работать в передаче энергии ПТ до напряжений 1500 кВ, но применяются на коротких линиях, либо возможна промежуточная подпитка; при этом рабочая напряженность достигает $E_p=40$ кВ/мм.

ГНК ПТ могут работать при напряжениях 300 кВ и выше. Их длина секции подпитки намного выше МНК, что практически не ограничивает их длину. ГНК ПТ на напряжение 250 кВ проложены в Новой Зеландии через пролив Кука; бумажная изоляция работает под давлением 3 МПа; рабочая напряженность составляет $E_p=(20-25)$ кВ/мм, однако стоимость таких кабелей достаточно велика.

Кабели с ПЭ изоляцией не требуют подпитки, имеют ряд преимуществ перед другими типами кабелей как и при переменном напряжении; они находятся в стадии экспериментов и имеют большую перспективу.

Все описанные конструкции кабелей переменного напряжения и опыт их эксплуатации можно использовать для разработки КПП при соответствующей корректировке величины E_p и с учетом типа би- или униполярной передачи.

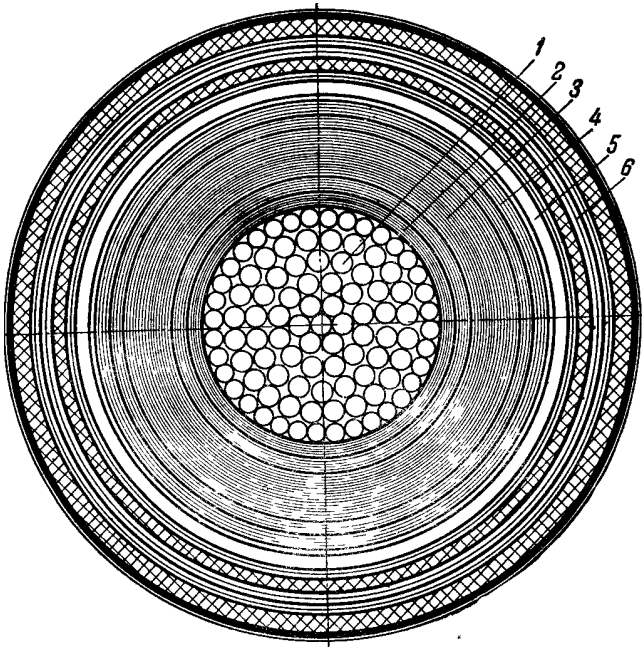


Рис. 16. Кабель постоянного тока на напряжение ± 200 кВ. 1 — токопроводящая жила; 2 — 4 — экран из лент металлизированной бумаги; 3 — изоляция из бумаг разной толщины; 5 — свинцовая оболочка; 6 — броня и защитные покрытия.

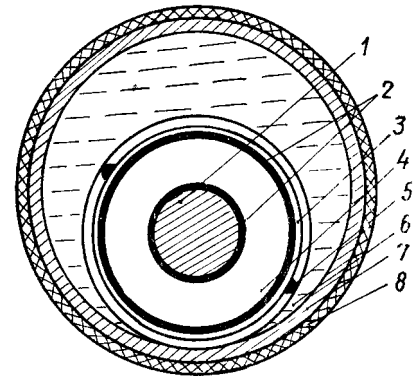


Рис. 17. Кабель постоянного тока на напряжение ± 400 кВ в стальном трубопроводе: 1 — жила из отдельных проволок; 2 — экран из лент металлизированной бумаги; 3 — медная перфорированная лента; 4 — изоляция из бумаг разной толщины; 5 — проволока скольжения; 6 — масло; 7 — стальной трубопровод; 8 — антикоррозионная защита

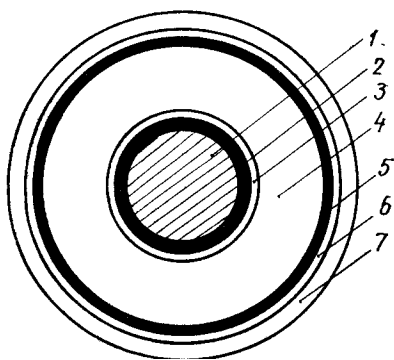


Рис. 18. Конструкция кабеля с изоляцией из СПЭ на напряжение 110 кВ и выше: 1 — жила алюминиевая, уплотненная; 2 — экран из полупроводящего ПЭ; 3 — эмиссионный слой; 4 — изоляция из СПЭ; 5 — экран из полупроводящего ПЭ; 6 — наполненная сажой крепированная бумага; 7 — свинцовая оболочка

1.2.7. силовые кабели с пластмассовой изоляцией на напряжение 110-500кВ.

Кабели с пластмассовой изоляцией имеют преимущества перед кабелями с БПИ низкого напряжения. Особенно заметны преимущества этих кабелей на напряжение 110 кВ и выше при замене МНК: а) отсутствие масла под давлением и всего дорогостоящего оборудования для подпитки кабельной линии; б) большая пропускная способность кабелей; в) возможность быстрого ремонта в аварийных ситуациях.

Первые кабели с термопластичным ПЭ в качестве изоляции были разработаны в конце 60-х годов; затем начали шире использовать СПЭ (вулканизированный), который в начале 80-х годов становится основным для высоковольтных кабелей, предназначенных для замены МНК. В 1986-1988 г.г. были изготовлены первые образцы кабелей с СПЭ на напряжения 400 и 500 кВ.

В нашей стране на напряжения 110 и 220 кВ используются кабели с алюминиевыми жилами сечением до 625 мм² с изоляцией из СПЭ. Жилы до 500 мм² включительно могут быть одно-проволочными, а больших сечений – комбинированными (многопроволочный сердечник и прессованная алюминиевая оболочка, которая делает поверхность жилы гладкой и обеспечивает продольную герметизацию по жиле).

Типичная конструкция кабеля, разработанная в США, представлена на рис. 18; примерно такую же выпускает отечественная промышленность (вместо свинцовой оболочки накладывается поверх полупроводящего экрана медный гофрированный экран, отсутствие крепированной бумаги и т.д.). Отечественные кабели имеют особенности, обеспечивающие значительное повышение технико-экономических и эксплуатационных показателей: а) в качестве изоляции применяется СПЭ, предварительно очищенный методом фильтрации от посторонних примесей с размерами более 50 мкм; б) благодаря наложению на поверхность электропроводящего экрана по жиле слоя полимерной композиции с $\epsilon_r=4,5$ (имеет в своем составе T_iO_2) снижена напряженность электрического поля, полимерная композиция обладает антиэмиссионными свойствами (захватывает свободные электроны эмиссии с поверхности электропроводящего экрана при высоких напряжениях электрического поля); в) наложение изоляции, электропроводящих экранов и эмиссионного слоя производится методом экструзии за один проход с последующей их вулканизации в беспаровой среде ("сухой" способ вулканизации), что исключает влагу и газовые включения в объеме изоляции.

Длительно допустимая $E_p=10$ МВ/м, однако совершенствование технологии изготовления, очистка полимеров позволяет поднять E_p до 11-13

МВ/м. Толщина изоляции с эмиссионным слоем (эмиссионный слой – 0,45 мм, экран из саженаполненного СПЭ – 1,15 ÷ 1,25 мм) для 220 кВ – 23 мм при $E_p=10$ МВ/м. Рабочая температура на жиле не превышает 90° С. поверх экрана по изоляции накладывается экран из медной ленты толщиной 0,25 мм, гофрированной в поперечном направлении и проложенной продольно с перекрытием. Этот экран обматывается нитью из полиэтилентерефталата (ПЭТФ), а затем накладывается продольно ПЭТФ лента. Наружная оболочка толщиной 2,8 мм может быть выполнена из ПЭ, самозатухающего ПЭ или ПВХП. Если кабель прокладывается на сложных участках трасс, то поверх гладкой оболочки накладывается дополнительная наружная ребристая оболочка (толщина по выступам составляет 3,5 мм). Допустимый радиус изгиба кабеля при прокладке составляет 15 (D+d), где D – наружный диаметр кабеля; d – диаметр жилы. Срок службы кабеля составляет не менее 25 лет.

Благодаря совершенствованию конструкции и технологии изготовления, очистке полимера удалось повысить рабочую напряженность E_p и, соответственно, уменьшить толщину изоляции. Ранее E_p составляло 8-10 кВ/мм, теперь доходит до 12-13,5 кВ/мм: это кабели второго поколения. Свою роль сыграл эмиссионный слой и "сухая" вулканизация ПЭ. Все конструкции кабелей имеют элементы продольной и радиальной герметизации, т.к. проникновение влаги в изоляцию приводит к зарождению и росту водных триингов (ВТ), которые представляют собой цилиндрические каналы диаметром около 1 мкм, заполненные водой. Их рост приводит к пробое изоляции и выходу кабеля из строя. Различные фирмы применяют разные способы герметизации, например: 1) ПЭ оболочку; 2) многослойную оболочку из металлических или металлопластмассовых лент, имеющих хорошую взаимную адгезию; 3) сплошную металлическую оболочку.

Продольная герметизация имеет большое значение в случае повреждения радиального барьера. Продольная герметизация может быть сплошной или дискретной: сплошная или комбинированная жила, набухающей слой пудры поверх электропроводящего экрана по изоляции, гигроскопичные ленты между экраном по изоляции и металлическим экраном. Пудра или ленты набухают, значительно увеличиваясь в объеме, и создают продольную герметизацию кабеля.

Накопленный опыт конструирования и эксплуатации кабелей с экструдированной изоляцией на напряжение 110, 220 и 345 кВ дает возможность разрабатывать кабели такого типа на переменное напряжение 400-500 кВ. По данным США ориентировочная толщина изоляции из СПЭ составляет: для напряжения 138 кВ – 12,6 мм, 230 кВ – 019,0 мм, 345 кВ – 26,2 мм.

Французская фирма Silec разработала кабель на напряжение 400 кВ с изоляцией из пластичного ПЭ низкой плотности со следующими параметрами: толщина изоляции 27-30 мм (в зависимости от сечения жилы), $E_{расч.}=13,5$ МВ/м; кабель выдержал испытания грозовым импульсом напряжением 1678 кВ и длительные испытания на 200-метровой петле (с двумя концевыми и двумя соединительными муфтами) при напряжении 400 кВ в течении 10000 ч. и температуре на жиле вначале 80° С, а затем 85° С; за это время кабель выдержал 350 циклов нагрева.

Первые кабели на напряжение 500 кВ разработаны в Японии (фирма Fujikura) с толщиной изоляции 32 мм из СПЭ. Применена тщательная очистка ПЭ, снижающая средний размер включений в изоляции до 50 мкм. Медная жила состоит из изолированных друг от друга секторов; толщина экрана по жиле 2,5 мм, по изоляции – 0,5 мм; поверх экрана по изоляции наложена электропроводящая подушка толщиной 3 мм, а затем экран из медных проволок, скрепленных обмоткой лентой. Металлическая гофрированная оболочка из алюминия толщиной 3,1-3,4 мм или гофрированная оболочка из нержавеющей стали толщиной 0,8 мм. Последняя более предпочтительна, т.к. потери в ней минимальны и, в сочетании с медным экраном, она наиболее устойчива при коротком замыкании. Поверх металлической оболочки наложен шланг из ПВХП толщиной 6,0 мм. При сечении жилы 2500 мм² наружный диаметр кабеля составляет 172 мм, масса 46,4 т/км; пропускная способность кабеля составляет 1600 МВ·А при токе 1850 А. Кабель выдерживает изгиб на диаметр, равный пяти диаметрам по гофрированной оболочке. Кабель выдержал испытания переменным напряжением 1090 кВ в течение 1 ч при 20° С и 890 кВ в течение 12 ч при температуре 90° С. При импульсивных испытаниях кабель выдержал при 20° С один удар 2860 кВ и при 90° С – два удара 2480 кВ.

3. Муфты силовых кабелей.

Кабельные муфты (кабельная арматура) предназначены для соединения отдельных строительных длин кабеля при прокладке кабельных линий (соединительные муфты – СМ) и оконцевание кабелей в местах присоединения к источнику энергии или потребителю (концевые муфты – КМ).

Стопорные (СтМ) и полустопорные (ПСтМ) муфты применяются для соединения отдельных строительных длин и предотвращения перетекания масла или пропиточной массы из одной секции в другую. ПСтМ отличаются от СтМ тем, что в конструкции предусмотрены патрубки с вентилями,

открыв которые можно перепустить масло из одной секции в другую (это важно в случае аварийной ситуации для подкачки масла).

Конструкции муфт разнообразны, т.к. они определяются типом кабелей, рабочим напряжением, условиями установки и размещения и типом изоляции. Для муфт с бумажной изоляцией применяется ручная подмотка предварительно пропитанных рулонов кабельной бумаги. Это не только усложняет процесс монтажа арматуры, но возможно ее увлажнение и попадание пыли. Пониженная электрическая прочность бумажной подмотки приводит к увеличению толщины изоляции муфты до двух раз.

Конструкция и монтаж муфт существенно упрощается, если использовать для монтажа предварительно изготовленные детали, наиболее пригодные для этих целей эпоксидные компаунды (эпоксидная смола, пластификатор, наполнитель, отвердитель). Литая эпоксидная изоляция имеет не высокую электрическую прочность по сравнению БПИ, поэтому находит применение для муфт до 35 кВ включительно. Для арматуры МНК на напряжение 110 кВ применяются заранее изготовленные детали из эпоксидных компаундов, что значительно упрощает монтаж, уменьшает габаритные размеры и улучшает электрические параметры изоляции муфт.

Для кабелей с пластмассовой изоляцией успешно используется литая изоляция арматуры из компаундов на основе ПЭ, этиленпропилена и др. Большое распространение получила изоляция в виде подмотки из полимерных лент, которая в ряде случаев оказывается более экономичной, чем изоляция из литых пластмассовых деталей.

Перед монтажом муфт производится разделка конца кабеля (напр., рис. 19); при этом изоляция снижается по закономерности, полученной с помощью электрического расчета. Монтаж кабельных муфт предусматривает два условия: 1) электрическое соединение концов кабелей в муфте должно иметь сопротивление не больше сопротивления жилы кабеля, иначе в этом месте будет перегрев и интенсивное тепловое старение изоляции; это достигается путем увеличенного сечения места соединения; 2) электрическая прочность изоляции в муфте должна быть не меньше электрической прочности изоляции кабеля; это достигается увеличенной толщиной изоляции муфты (часто удвоенной толщины).

На рис. 20 и 21 представлены конструкции соединительных муфт. Гибкая СМ (рис. 21, фирма Pirelli) применяется для одножильных МНК; их диаметр мало отличается от диаметра кабеля, что дает возможность использовать их и наматывать на барабан несколько строительных длин кабеля. Подмотка изоляции муфты размещается в свинцовом корпусе, который после заполнения муфты маслом обжимается и плотно прилегает к изоляции кабеля и подмотке.

СтМ МНК на 110 кВ представлена на рис. 22; разделка концов кабелей, подмотка изоляции и монтаж аналогичен СМ с учетом особенностей конструкции СтМ.

Электрическое поле в изоляции кабеля в большинстве случаев близко к радиальному, но в КМ в месте обрыва металлической оболочки оно становится более неоднородным, что должно учитываться в конструкции изоляции КМ. Для защиты изоляции кабеля и дополнительной изоляции КМ от увлажнения и загрязнения применяется фарфоровый изолятор (рис. 23). Для уменьшения потерь на корону верхняя часть КМ класса напряжения выше 35 кВ экранируется, т.к. крышка и все ее детали находятся под высоким напряжением.

Для автоматического поддержания давления масла в кабельных линиях МНК низкого давления до 0,3 МПа в свинцовой оболочке применяют баки давления (рис. 24), а для подпитки маслом кабельной линии – баки питания (рис. 25); однако на новых кабельных линиях последние не применяются, т.к. их необходимо поднимать над уровнем кабельной линии и помещать в специальные будки.

Для автоматического поддержания давления масла в кабельных линиях с кабелями типа МВДТ применяют масляные насосы.

За последние годы широкое распространение приобретает термоусаживаемая кабельная арматура, которая основана на технологии сшитых полимеров с пластической памятью формы. В сравнении с обычными полимерами они обладают улучшенными механическими свойствами, химической и термической стойкостью. Готовые детали комплекта арматуры подвергаются радиационному облучению (без остаточной радиации), что позволяет запомнить форму, а затем в горячем виде они подвергаются растяжению и в таком растянутом виде поставляются в комплекте. Во время монтажа растянутые элементы нагреваются рассеянным пламенем пропан-бутановой газовой горелки, происходит их усадка, что образует плотный водонепроницаемый охват кабеля; при этом термоплавкий подклеивающий состав и наполнитель заполняют все пустоты. Лидером термоусаживаемой кабельной арматуры является всемирно известная немецкая фирма Райхем (Rauchem). Она выпускает концевые муфты внутренней и наружной установки и соединительные муфты до 1 кВ, 6, 10, 20 и 35 кВ, системы подключения к элегазовым ячейкам распределительных устройств до 24 кВ, системы уплотнения кабельных проходов сквозь стены и перекрытия, ремонтные муфты и трубки, оконцеватели кабелей, инструмент и принадлежности для монтажа. В России крупнейший разработчик и изготовитель различных видов термоусаживаемых кабельных муфт на напряжение до 35 кВ является ЗАО

"Термофит" (г. Санкт-Петербург); по основным параметрам кабельные муфты этой фирмы не уступают муфтам зарубежных фирм, но значительно ниже в цене. В г. Москве изготовителем термоусаживаемых оконцевателей является фирма "Мемотерм – ММ".

Термоусаживаемые муфты являются современными изделиями с наукоемкими технологиями: получается качественная и надежная продукция и существенно улучшаются условия монтажа в полевых условиях.

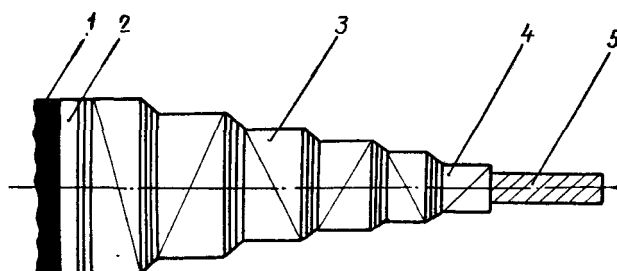


Рис. 19. Вид разделки кабеля перед монтажом соединительной муфты: 1 – металлическая оболочка; 2 – экран по изоляции; 3 – сходы ступенчатой разделки заводской изоляции; 4 – экран по жиле; 5 – жила.

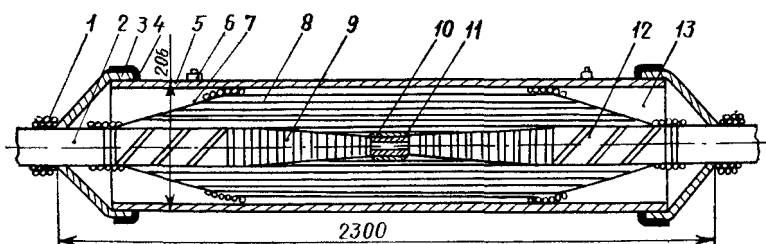


Рис. 20. Соединительная муфта маслонаполненного кабеля низкого давления на напряжение 220 кВ: 1 – усиливающий проволочный бандаж; 2 – оболочка кабеля; 3 – раструб; 4 – пайка; 5 – корпус муфты; 6 – болт заземления; 7 – сход от изоляции муфты к изоляции кабеля; 8 – изоляция муфты; 9 – разделка изоляции кабеля; 10 – соединительная гильза; 11 – токопроводящая жила кабеля; 12 – изоляция кабеля; 13 – изоляционное масло.

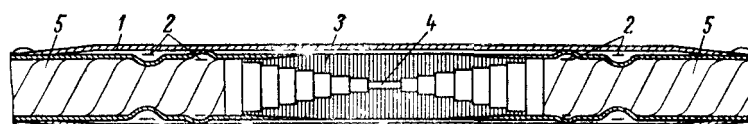


Рис. 21. Гибкая соединительная муфта. 1 – свинцовая оболочка; 2 – кольцо из эластичного материала; 3 – подмотка; 4 – соединительная гильза; 5 – соединяемые концы кабелей.

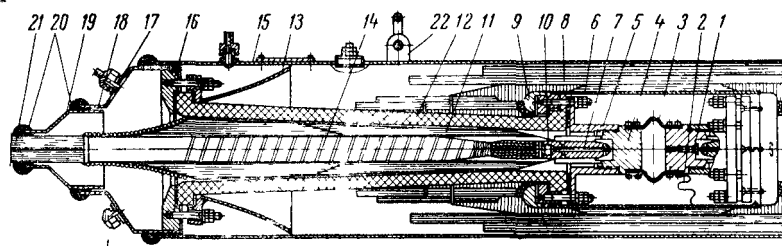


Рис. 1.22. Стопорная муфта маслонаполненного кабеля 110 кв. 1 – розеточный контакт; 2 – контактная проволока; 3 – гибкое соединение; 4 – розеточный контакт; 5 – фланец изолятора; 6 – труба центрального экрана; 7 – наконечник; 8 – намотка по центральной части; 9 – опорная втулка центрального экрана; 10 – клапан наконечника; 11 – намотка по изоляции кабеля; 12 – изолятор; 13 – раструб экрана; 14 – изоляция кабеля; 15 – труба-кожух; 16 – фланец вводной части; 17 – ниппель; 18 и 19 – конусы; 20 – пайка мягким припоем; 21 – свинцовая оболочка маслонаполненного кабеля; 22 – хомут кольцо.

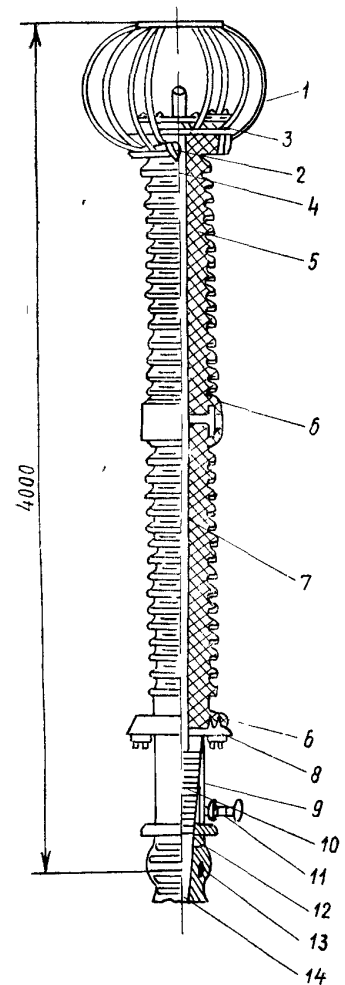


Рис. 23. Концевая муфта маслонаполненного кабеля низкого давления на напряжение 220 кВ. 1 – экран; 2 – вывод токопроводящей жилы; 3 – крышка; 4 – жила кабеля; 5 – изолятор; 6 – съемное соединение; 7 – изоляция в виде подмотки конденсаторного типа; 8 – опорная плита; 9 – металлическая труба хвостовика; 10 – выравнивающий сход; 11 – вентиль; 12 – переходный патрубок; 13 – пайка; 14 – изоляция кабеля.

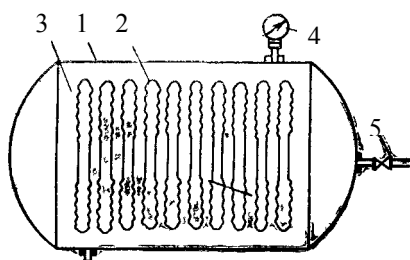


Рис. 24. Схема устройства бака давления. 1 – кожух бака; 2 – упругие элементы, заполненные азотом; 3 – дегазированное масло; 4 – манометр; 5 – штуцер для присоединения бака к кабелю.

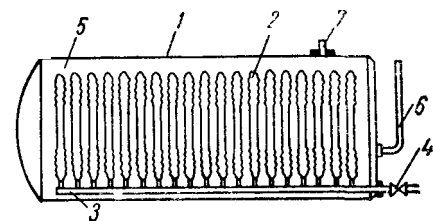


Рис. 25. Схема устройства бака питания. 1 – кожух бака; 2 – упругие элементы, заполненные активным маслом; 3 – коллектор; 4 – вентиль и штуцер для присоединения бака к кабелю; 5 – неактивное масло; 6 – масломерное стекло; 7 – соединение бака с атмосферой.

На рисунке 26 показана муфта, предназначенная для оконцевания 3-х и 4-х жильных силовых кабелей с бумажной пропитанной и пластмассовой изоляцией, напряжением до 1 кВ. В инструкции по монтажу дается детальное описание выполнения работ по каждой технологической операции. В табл. 13 представлены типоразмеры и комплектация муфт напряжением до 1 кВ.

Таблица 13.

Муфта внутренней установки типа ТЕРМОФИТ

Типоразмер	1 КВТп-1М 1КВТп-1МА	1КВТп-1 1 КВТп-1А	1 КВТп-2 1 КВТп-2А
для 3-х жильных кабелей сечением, мм ²	16; 25	35; 50; 70; 95	120; 150; 185; 240

в составе:

перчатка – 1 шт., жильная трубка – 1 шт., манжеты концевые (цветные) – 3 шт., манжета поясная – 1 шт., набор деталей непаянного заземления (в комплектацию А не входит) – 1 шт.

Продолжение табл. 13.

Типоразмер	1 КВТп-3М 1КВТп-3МА	1КВТп-3 1 КВТп-3А	1 КВТп-4 1 КВТп-4А
для 4-х жильных кабелей сечением, мм ²	16; 25	35; 50; 70; 95	120; 150; 185

в составе:

перчатка – 1 шт., жильные трубки – 1 или 2 шт., манжеты концевые (цветные) – 4 шт., манжета поясная – 1 шт., набор деталей непаянного заземления (в комплектацию А не входит) – 1 шт.

На рис. 27 представлена муфта, предназначенная для оконцевания 3-х жильных силовых кабелей с бумажной пропитанной и пластмассовой изоляцией напряжением до 10 кВ включительно внутренней установки. Типоразмеры муфт приведены в табл. 14, а комплектация – в таблице 15.

Таблица 14.

Типоразмеры муфты Термофит – 10 КВТп

Обозначение муфты	Для жил сечением, мм ²
10 КВТп – 5 10 КВТп – 5а	16;25; 35; 50
10 КВТп – 6 10 КВТп – 6а	70;95; 120
10 КВТп – 7 10 КВТп – 7а	150;185; 240

Таблица 15.

Комплект муфты ТЕРМОФИТ – 10 КВТп

в составе:

Наименование деталей	Кол-во	10 КВТп – 5	10 КВТп – 6	10 КВТп – 7
		10 КВТп – 5а	10 КВТп – 6а	10 КВТп – 7а
		Обозначение и основные размеры деталей		
Перчатка	1 шт.	3-1-10	3-2-10	3-3-10
Жильная труба	Рулон	20 x 2,4 м	28 x 2,4 м	33 x 2,4 м
Манжета концевая	3 шт.	20 x 100	33 x 120	33 x 120
Манжета поясная	1 шт.	50 x 150	60 x 200	80 x 200
Лента-регулятор	Рулон	25 x 800	25 x 1000	25 x 1200
Набор заземления	Компл.	16 мм ²	25 мм ²	25 мм ²

На рис. 28 представлена соединительная муфта типа Термофит – 10 СТп – А, предназначенная для 3-х жильных силовых кабелей с бумажной пропитанной и пластмассовой изоляцией напряжением до 10 кВ включительно. Выпускаемые комплекты указаны в табл. 16.

Таблица 16.

Комплекты соединительной муфты типа Термофит – 10 СТп

Обозначение комплекта	Сечения жил, мм ²
10 СТп – 7 МП	16; 25
10 СТп – 7 А	35; 50
10 СТп – 8 А	70; 95; 120
10 СТп – 9 А	150; 185; 240

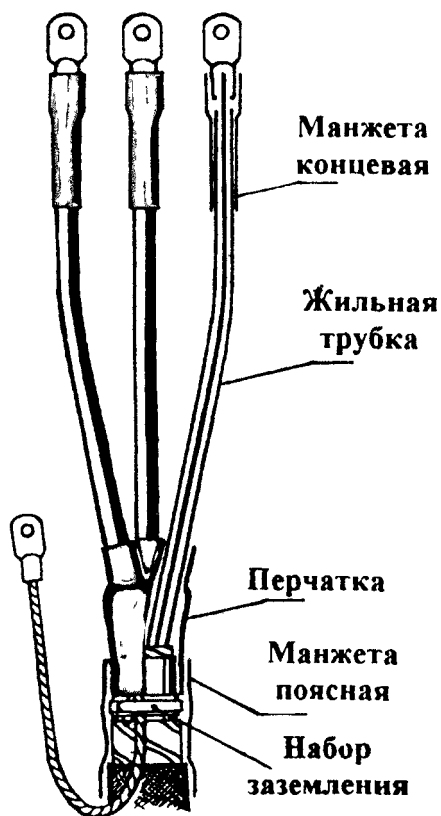


Рис. 26. Термоусаживаемая концевая муфта внутренней установки типа Термофит – 10кВТп.

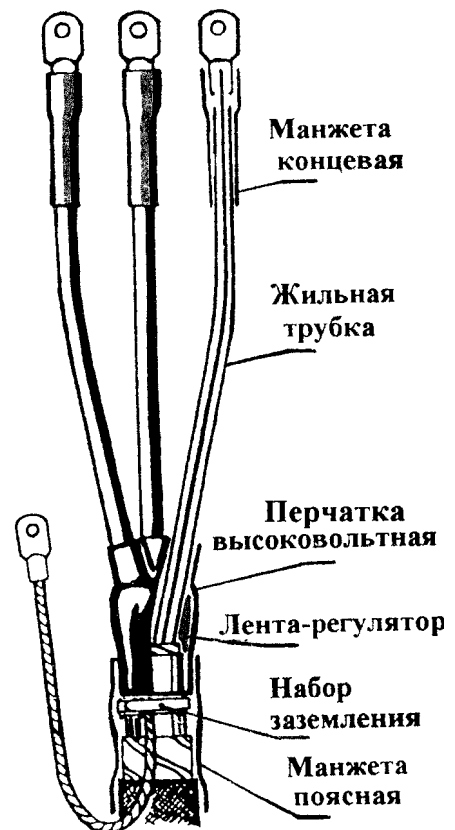


Рис. 27. Термоусаживаемая концевая муфта внутренней установки типа Термофит – 10кВТп.

Схема изоляции корешка разделки

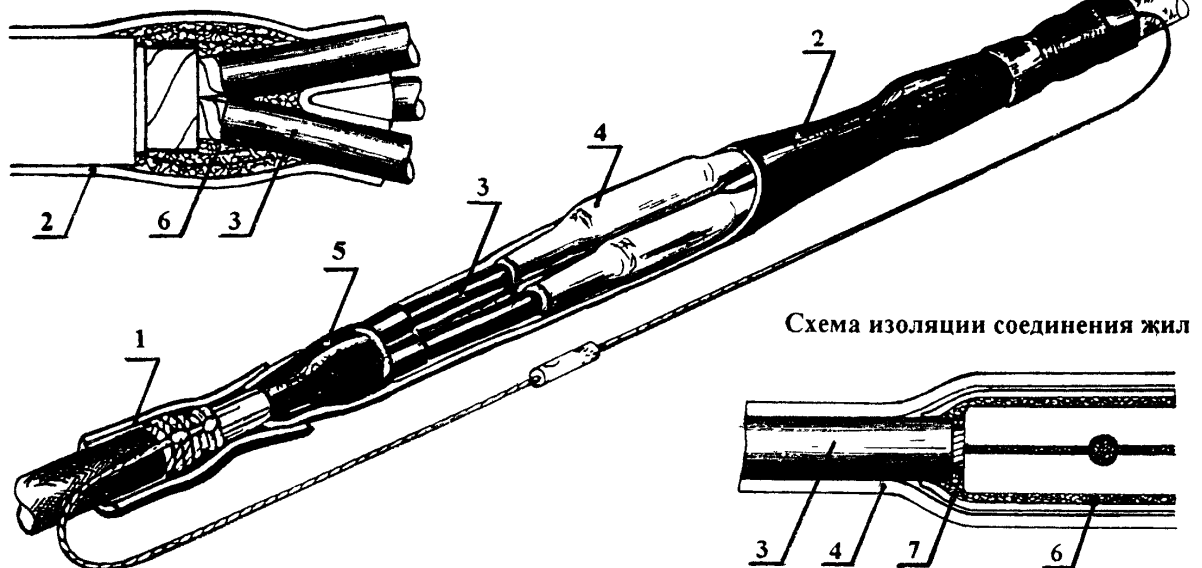


Рис. 28. Схема размещения деталей комплекта типа ТЕРМОФИТ – 10 СТп (комплектация А) на соединении кабелей, где 1 – поясная манжета; 2 – шланг; 3 – жильная трубка; 4 – манжета изолирующая; 5 – перчатка высоковольтная; 6 – лента-регулятор; 7 – манжета подкладная.

Комплект ТЕРМОФИТ – 10 СТп – (комплектация А)

в составе:

Наименование деталей	Кол-во	10 СТп–7 МА	10 СТп–7 А	10 СТп–8 А	10 СТп–9 А
Обозначение деталей					
Перчатка	2 шт.	3-1-10	3-1-10	3-2-10	3-3-10
Жильная трубка	Рулон	20 x 1,5 м	20 x 1,7 м	33 x 2,1 м	33 x 2,1 м
Манжета подкладная	3 шт.	20 x 80	28 x 100	45 x 130	45 x 160
Манжета изолирующая	3 шт.	25 x 4 x 120	34 x 4 x 150	42 x 5 x 200	50 x 5 x 230
Лента регулятор	2 шт.	25 x 0,6 м	25 x 0,8 м	25 x 1 м	25 x 1,2 м
	3 шт.	60 x 60	80 x 80	110 x 110	140 x 140
Шланг	Рулон	60 x 0,7 м	60 x 0,75 м	80 x 0,9 м	100 x 0,9 м
Манжета поясная	2 шт.	60 x 150	60 x 150	80 x 200	80 x 200

За последнее время большое распространение получили кабельные вводы (КВ). Они предназначены для закрытого соединения кабеля с масляным трансформатором (КВТ) или комплектным распределительным устройством с элегазовой изоляцией (КРУЭ). В качестве изоляции используется электрически прочный газ SF_6 (элегаз) под давлением 0,25 МПа. КВТ получили большое распространение, т.к. все части соединения с высоким потенциалом находятся внутри металлического заземленного кожуха, заполненного изоляционным маслом (рис. 29), что существенно сокращает габариты соединения. КРУЭ разработаны для МНК на напряжения 110-500 кВ и с пластмассовой изоляцией на 110 кВ.

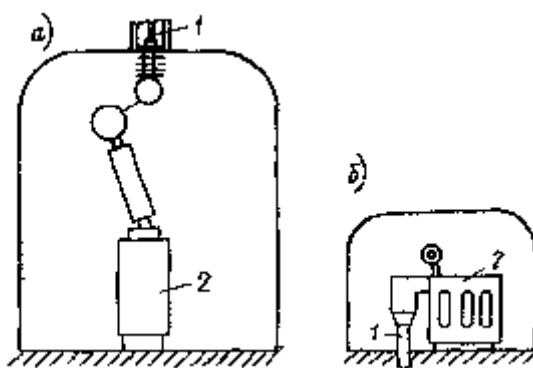


Рис. 29. Подключение кабеля к трансформатору с открытым – а и встроенным кабельным вводом б: 1 – кабель; 2 – трансформатор.

Трансформаторы с КВТ можно располагать около генератора или непосредственно у потребляющего электроэнергию объекта, что дополнительно экономит площади, электроэнергию и т. д. В нашей стране КВТ находят применение на напряжения 35—500 кВ для глубоких вводов энергии в машиностроительной, металлургической и химической промышленности. Для уменьшения габаритов КВТ концевые кабельные муфты и проходные вводы трансформатора имеют изоляцию с конденсаторными подмотками, что уменьшает высоту фарфоровых изоляторов, в которых расположены муфты и ввод, в 2—2,5 раза по сравнению с размером вводов и муфт, расположенных на воздухе. Полости трансформатора и кабеля разделены между собой, поэтому для заполнения кожуха КВТ используется трансформаторное масло. Внутри кожуха устанавливается система барьеров из бакелитовых цилиндров; соединительное устройство изолируется несколькими слоями пропитанной кабельной бумаги.

Расстояние между элементами КВТ, габариты изоляции, места расположения барьеров и других конструктивных элементов определяются на основании электрических расчетов и моделирования электрического поля в КВТ.

Литература.

1. Н.Н. Тиходеев. Передача электрической энергии. Под редакцией В.И. Попкова. 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1984.–248 с.: Ил.
2. Э.Т. Ларина. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии: Учебник для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп.–М.: Энергоатомиздат 1996.–464 с.: Ил.
3. Техника высоких напряжений: Учебное пособие для вузов. Под ред. Г.С. Кучинского. Авт.: И.М. Богатенков, Г.М. Иманов, В.Е. Кизеветтер и др. – СПб: Изд. ПЭИПК, 1998.–700 с.: Ил.
4. В.А. Канискин, Б.И. Сажин. Основы кабельной техники: Учебное пособие. – Л.: ЛПИ, 1990.–88 с.: Ил.
5. Н.И. Белоруссов, А.Е. Саакян, А.И. Яковлева. Электрические кабели, провода и шнуры: Справочник. Под ред. Н.И. Белоруссова. – 5 изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987.–536 с.: Ил.
6. С.Д. Холодный. Методы испытаний и диагностика кабелей и проводов. М.: – Энергоатомиздат, 1991.–200 с.: Ил.

Оглавление

Введение.....	3
Часть 1. Конструкции силовых электрических кабелей	
1. История развития кабельной техники.....	4
2. Конструкции силовых кабелей.....	9
2.1. Классификация и маркировка силовых кабелей.....	10
2.2. Кабели с бумажной пропитанной изоляцией низкого напряжения.....	13
2.3. Силовые кабели с пластмассовой изоляцией на напряжение 1–35 кВ.....	20
2.4. Силовые кабели с резиновой изоляцией.....	23
2.5. Силовые кабели нераспространяющие горение и огнестойкие.....	26
2.6. Силовые кабели высокого напряжения с бумажной изоляцией.....	31
2.7. Силовые кабели с пластмассовой изоляцией на напряжение 110-500 кВ.....	48
3.Муфты силовых кабелей.....	50
4.Литература.....	60