

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Амурский государственный университет»

Изоляция электроустановок

Методические указания

к практическим работам

Благовещенск
Издательство АмГУ

2014

Разработано в рамках реализации гранта «Подготовка высококвалифицированных кадров в сфере электроэнергетики и горно-металлургической отрасли для предприятий Амурской области» по заказу предприятия-партнера по заказу предприятия-партнера ОАО «ФСК ЕЭС»

Рецензенты:

Павлова О.Г. секретарь руководителя МЭС Востока филиала ОАО «ФСК - ЕЭС»

Федотов А.И. д.т.н., профессор кафедры «Электроэнергетические системы и сети» ФГБОУ ВПО «КГЭУ»

Изоляция электроустановок: методические указания для практических работ / составитель В.В. Соловьев. - Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2014. – 120 с.

Методические указания содержит теоретические сведения по общему курсу «Изоляция электроустановок». Рассмотрены вопросы расчета изоляционных конструкций. Приведены материалы для самостоятельной работы.

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по направлению подготовки 140400.62 – «Электроэнергетика и электротехника».

В авторской редакции.

ББК.....

Введение

Руководство к практическим занятиям по курсу "Изоляция электроустановок" предназначено для бакалавров по направлению "140400 –Электроэнергетика и электротехника" содержит теоретический материал, примеры и задачи по следующим разделам курса:

- расчет потерь электроэнергии при развитии коронного разряда;
- расчет числа изоляторов в гирлянде ВЛ;
- расчет масляной и комбинированной изоляции на примере кабельных линий, высоковольтного ввода и высоковольтного конденсатора.

Каждый раздел дополнен вопросами для самопроверки, что помогает студентам полнее изучить и закрепить теоретический материал. Приведенные примеры решения задач по каждому разделу позволяют усвоить методические приемы и подходы при решении однотипных задач или задач, близких им по типу, и подготовить студентов к самостоятельной работе.

Основной целью данного руководства является более глубокое изучение основных разделов курса по проектированию изоляции электроэнергетического оборудования высокого напряжения, а также приобретение практических навыков при решении ряда вопросов, связанных с проектированием, разработкой и созданием высоковольтного оборудования для электроэнергетики.

Руководство содержит обширный справочный материал, что позволяет облегчить достижение поставленной цели.

Классификация электрической изоляции

Электрическая изоляция является одним из важнейших элементов, обеспечивающих безаварийность и долговечность работы высоковольтных аппаратов и конструкций. Кроме электрического изолирования проводников, находящихся под различными потенциалами, изоляция должна выдерживать большие механические, тепловые и другие нагрузки (воздействия), которые могут возникать в эксплуатации.

Изоляция высоковольтных конструкций подразделяется на внешнюю и внутреннюю.

Внешняя изоляция – это воздушные промежутки и поверхность твердой изоляции в атмосферном воздухе, которые подвергаются влиянию атмосферных и других внешних воздействий (загрязнение, увлажнение и т. п.). Они существенно затрудняют условия работы изоляции в открытой атмосфере.

Внутренняя изоляция – это твердая, жидкая или газообразная изоляция (или их комбинации) внутренних частей электрооборудования, не подвергающаяся непосредственному влиянию атмосферного и других видов внешних воздействий (загрязнение, увлажнение, воздействие птиц и микроорганизмов).

После пробоя и снятия напряжения газовая изоляция (воздух, высокопрочные газы) полностью восстанавливает свою первоначальную электрическую прочность, т. е. этот процесс является обратимым. Жидкая изоляция после пробоя восстанавливает свою прочность частично, т. к. пробой приводит к ухудшению ее характеристик. Пробой твердой и комбинированной изоляции (бумажно-масляная, маслобарьерная) – явление необратимое, изоляция подлежит замене.

Электрооборудование, предназначенное для работы в электрических сетях, подразделяется на классы напряжения. Классом напряжения называется номинальное междуфазное (линейное) напряжение электрической сети, для работы в которой предназначено электрооборудование. Каждый класс напряжения характеризуется своим уровнем изоляции, под которым понимается совокупность испытательных напряжений, установленных стандартом (например, ГОСТ 1516.1–76) или техническими условиями для внутренней и внешней изоляции данного оборудования.

Электрическая изоляция работает как в однородном (достаточно редко), так и в неоднородном (гораздо чаще) электрических полях.

В однородном поле вектор напряженности вдоль силовых линий сохраняет свое значение ($E = \text{const}$), а в неоднородном – изменяется ($E = \text{var}$). При этом силовые линии поля в однородном поле параллельны друг другу (электроды Роговского или плоский конденсатор), а в неоднородном – как правило, не параллельны (острие–плоскость).

Наружная изоляция электроустановок

Наружная высоковольтная изоляция работает в непосредственном контакте с атмосферным воздухом. В условиях эксплуатации такая изоляция (изоляторы) подвергается воздействию электрического поля, механических усилий и вибрации, метеорологических (атмосферных) факторов.

По назначению изоляторы делятся на линейные и станционно-аппаратные, которые, в свою очередь, делятся на опорные и проходные.

Станционно-аппаратные изоляторы могут изготавливаться не только для наружных, но и для внутренних установок, предназначенных для работы в закрытых помещениях. Для наружной установки изоляторы изготавливают с нормальной и усиленной внешней изоляцией, т. е. с увеличенной длиной пути утечки тока по поверхности изолятора (за счет применения ребер). Изоляторы внутренней установки имеют обычно гладкую или слаборебристую поверхность.

Изолятор состоит из диэлектрика (фарфор, стекло, стеатит, ситалл) и металлической арматуры для крепления изолятора в условиях эксплуатации. В последнее время в качестве наружной изоляции применяются полимерные изоляторы на основе эпоксидных компаундов, кремнийорганических и полиэфирных смол с минеральными наполнителями. Такие изоляторы имеют высокую электрическую прочность, малый вес и достаточную трекингостойкость. С целью повышения механической прочности изоляторов производится их армирование стекловолокном (стеклопластиковые изоляторы).

Наибольшее распространение в электроэнергетике получили изоляторы из фарфора и стекла.

Внутренняя изоляция электроустановок

Внутренней изоляцией называются части изоляционной конструкции, в которых изолирующей средой являются жидкие, твердые или газообразные диэлектрики или их комбинации, не имеющие прямых контактов с атмосферным воздухом.

Целесообразность или необходимость применения внутренней изоляции, а не окружающего нас воздуха обусловлена рядом причин.

Во-первых, материалы для внутренней изоляции обладают значительно более высокой электрической прочностью (в 5-10 раз и более), что позволяет резко сократить изоляционные расстояния между проводниками и уменьшить габариты оборудования. Это важно с экономической точки зрения.

Во-вторых, отдельные элементы внутренней изоляции выполняют функцию механического крепления проводников, жидкие диэлектрики в ряде случаев значительно улучшают условия охлаждения всей конструкции.

Виды внутренней изоляции и материалы, используемые для их изготовления.

В установках высокого напряжения и оборудования энергосистем используется несколько видов внутренней изоляции. Наиболее широкое распространение получили **бумажно-пропитанная (бумажно-масляная) изоляция, маслосбарьерная изоляция, изоляция на основе слюды, пластмассовая и газовая.**

Эти разновидности обладают определенными достоинствами и недостатками, имеют свои области применения. Однако их объединяют некоторые общие свойства:

- сложный характер зависимости электрической прочности от длительности воздействия напряжения;
- в большинстве случаев необратимость разрушения при пробое;
- влияние на поведение в эксплуатации механических, тепловых и других внешних воздействий;
- в большинстве случаев подверженность старению.

Бумажно-пропитанная изоляция (БПИ)

Исходными материалами служат специальные электроизоляционные бумаги и минеральные (нефтяные) масла или синтетические жидкие диэлектрики.

Основу бумажно-пропитанной изоляции составляют слои бумаги. Рулонная бумажно-пропитанная изоляция (ширина рулона до 3,5 м) применяется в секциях силовых конденсаторов и в вводах (проходных изоляторах); ленточная (ширина ленты от 20 до 400 мм) - в конструкциях с электродами относительно сложной конфигурации или большой длины (вводы высших классов напряжения, силовые кабели). Слои ленточной изоляции могут наматываться на электрод внахлест или с зазором между соседними витками. После намотки бумаги изоляция подвергается вакуумной сушке при температуре 100-120°C до остаточного давления 0,1-100 Па. Затем под вакуумом производится пропитка бумаги тщательно дегазированным маслом.

Дефект бумаги в бумажно-пропитанной изоляции ограничен пределами одного слоя и многократно перекрывается другими слоями. Тончайшие зазоры между слоями и большое количество микропор в самой бумаге при вакуумной сушке обеспечивает удаление из изоляции воздуха и влаги, а при пропитке эти зазоры и поры надежно заполняются маслом или другой пропиточной жидкостью.

Конденсаторные и кабельные бумаги имеют однородную структуру и высокую химическую чистоту. Конденсаторные бумаги самые тонкие и чистые. Трансформаторные бумаги используются в вводах, трансформаторах тока и напряжения, а также в элементах продольной изоляции силовых трансформаторов, автотрансформаторов и реакторов.

Для пропитки бумажной изоляции в силовых маслонаполненных кабелях 110-500 кВ используются маловязкие нефтяные или синтетические кабельные масла, а в кабелях до 35 кВ - маслонаполненные смеси повышенной вязкости.

В силовых и измерительных трансформаторах и вводах пропитка осуществляется трансформаторным маслом. В силовых конденсаторах применяется конденсаторное масло (нефтяное), хлорированные дифенилы или их заменители, а также касторовое масло (в импульсных конденсаторах).

Нефтяные кабельные и конденсаторные масла более тщательно очищены, чем трансформаторные.

Хлорированные дифенилы, обладая высокой относительной диэлектрической проницаемостью, повышенной стойкостью к воздействию частичных разрядов (ЧР) и негорючестью, токсичны и экологически опасны. Поэтому масштабы их применения резко сокращаются, их заменяют экологически чистыми жидкостями.

Для снижения диэлектрических потерь в силовых конденсаторах используют комбинированную изоляцию, в которой слои бумаги чередуются со слоями полипропиленовой пленки, у которой на порядок меньше чем у непропитанной бумаги. Такая изоляция обладает более высокой электрической прочностью.

Недостатками бумажно-пропитанной изоляции являются невысокая допустимая рабочая температура (не более 90°C) и горючесть.

Масло-барьерная (маслонаполненная) изоляция (МБИ).

Основу этой изоляции составляет трансформаторное масло. Оно обеспечивает хорошее охлаждение конструкции за счет самопроизвольной или принудительной циркуляции.

В состав масло-барьерной изоляции входят и твердые диэлектрические материалы - электрокартон, кабельная бумага и др. Они обеспечивают механическую прочность

конструкции и используются для повышения электрической прочности масло-барьерной изоляции. Из электрокартона выполняют барьеры а слоями кабельной бумаги покрывают электроды. Барьеры повышают электрическую прочность масло-барьерной изоляции на 30-50%, разделяя изоляционный промежуток на ряд узких каналов, они ограничивают количество примесных частиц, которые могут приближаться к электродам и участвовать в иницировании разрядного процесса.

Электрическую прочность масло-барьерной изоляции повышает покрытие электродов сложной формы тонким слоем полимерного материала, а в случае электродов простой формы - изолирование их слоями бумажной ленты.

Технология изготовления масло-барьерной изоляции включает сборку конструкции, сушку ее под вакуумом при температуре 100-120°C и заполнение (пропитку) под вакуумом дегазированным маслом.

К достоинствам масло-барьерной изоляции относятся сравнительная простота конструкции и технологии ее изготовления, интенсивное охлаждение активных частей оборудования (обмоток, магнитопроводов), а также возможность восстановления качества изоляции в эксплуатации путем сушки конструкции и замены масла.

Недостатками масло-барьерной изоляции являются меньшая, чем у бумажно-масляной изоляции электрическая прочность, пожаро- и взрывоопасность конструкции, необходимость специальной защиты от увлажнения в процессе эксплуатации.

Масло-барьерная изоляция используется в качестве главной изоляции в силовых трансформаторах с номинальными напряжениями от 10 до 1150 кВ, в автотрансформаторах и реакторах высших классов напряжения.

Изоляция на основе слюды имеет класс нагревостойкости В (до 130°C). Слюда имеет очень высокую электрическую прочность (при определенной ориентации электрического поля относительно кристаллической структуры), обладает стойкостью к воздействию частичных разрядов и высокой нагревостойкостью. Благодаря этим свойствам, слюда является незаменимым материалом для изоляции статорных обмоток крупных вращающихся машин. Основными исходными материалами служат микалента или стеклослюдинитовая лента.

Микалента представляет собой слой пластинок слюды, скрепленных лаком между собой и с подложкой из специальной бумаги или стеклоленты. Микалента используется в так называемой компаундированной изоляции, процесс изготовления которой включает намотку нескольких слоев микаленты, пропитку их при нагреве под вакуумом битумным компаундом и опрессовку. Эти операции повторяются для каждого

пяти-шести слоев до получения изоляции необходимой толщины. Компаундированная изоляция используется в настоящее время в машинах малой и средней мощности.

Более совершенной является изоляция, выполняемая из стеклослюдинитовых лент и терморезистивных пропиточных составов.

Слюдинитовая лента состоит из одного слоя слюдинитовой бумаги толщиной 0,04 мм и одного или двух слоев подложки из стеклоленты толщиной 0,04 мм. Такая композиция обладает достаточно высокой механической прочностью (за счет подложек) и отмеченными выше качествами, характерными для слюды.

Из слюдинитовых лент и пропитывающих составов на основе эпоксидных и полиэфирных смол изготавливают терморезистивную изоляцию, которая при нагреве не размягчается, сохраняет высокую механическую и электрическую прочность. Разновидности терморезистивной изоляции, используемые у нас в стране, называют “слюдотерм”, “монолит”, “монотерм” и т.д. Терморезистивная изоляция применяется в статорных обмотках крупных турбо- и гидрогенераторов, двигателей и синхронных компенсаторов с номинальными напряжениями до 36 кВ.

Пластмассовая изоляция в промышленных масштабах используется в силовых кабелях на напряжения до 220 кВ и в импульсных кабелях. Основным диэлектрическим материалом в этих случаях является полиэтилен низкой и высокой плотности. Последний имеет лучшие механические характеристики, однако менее технологичен из-за более высокой температуры размягчения.

Пластмассовая изоляция в кабеле располагается между полупроводящими экранами, выполняемыми из наполненного углеродом полиэтилена. Экран на токоведущей жиле, изоляция из полиэтилена и наружный экран наносятся методом экструзии (выдавливания). В некоторых типах импульсных кабелей применяются прослойки из фторопластовых лент. Для защитных оболочек кабелей в ряде случаев используется поливинилхлорид.

Газовая изоляция

Для выполнения газовой изоляции в высоковольтных конструкциях используется элегаз, или шестифтористая сера. Это бесцветный газ без запаха, который примерно в пять раз тяжелее воздуха. Он имеет наибольшую прочность по сравнению с такими инертными газами, как азот и двуокись углерода.

Чистый газообразный элегаз безвреден, химически неактивен, обладает повышенной теплоотводящей способностью и является очень хорошей дугогасящей

средой; он не горит и не поддерживает горение. Электрическая прочность элегаза в нормальных условиях примерно в 2,5 раза выше прочности воздуха.

Высокая электрическая прочность элегаза объясняется тем, что его молекулы легко присоединяют электроны, образуя устойчивые отрицательные ионы. Из-за этого затрудняется процесс размножения электронов в сильном электрическом поле, который составляет основу развития электрического разряда.

При увеличении давления электрическая прочность элегаза возрастает почти пропорционально давлению и может быть выше прочности жидких и некоторых твердых диэлектриков. Наибольшее рабочее давление и, следовательно, наибольший уровень электрической прочности элегаза в изоляционной конструкции ограничивается возможностью сжижения элегаза при низких температурах, например, температура сжижения элегаза при давлении 0,3 МПа составляет -45°C , а при 0,5 МПа равна -30°C . Такие температуры у отключенного оборудования наружной установки вполне возможны зимой во многих районах страны.

Для крепления токоведущих частей в комбинации с элегазом используются опорные изоляционные конструкции из литой эпоксидной изоляции.

Элегаз используется в выключателях, кабелях и герметизированных распределительных устройствах (ГРУ) на напряжения 110 кВ и выше и является весьма перспективным изоляционным материалом.

При температурах выше 3000°C может начаться разложение элегаза с выделением свободных атомов фтора. Образуются газообразные отравляющие вещества. Вероятность их появления существует для некоторых типов выключателей, предназначенных для отключения больших токов короткого замыкания. Поскольку выключатели герметически закрыты, появление ядовитых газов не опасно для эксплуатационного персонала и окружающей среды, но при ремонте и вскрытии выключателя необходимо принимать специальные защитные меры.

Практическая работа № 1

Потери на коронный разряд при передаче электроэнергии

Краткие теоретические сведения

Коронным разрядом, или просто короной, называется один из видов электрического разряда в газовой или воздушной среде, возникающей, в частности у поверхности проводов воздушных линий электропередачи и у поверхности любых электродов с малым радиусом кривизны под действием рабочего напряжения.

Коронный разряд при большом расстоянии между проводами и, следовательно, при небольшой величине средней напряженности электрического поля не приводит к перекрытию промежутка и может существовать длительно. Корона сопровождается свечением вблизи поверхности провода, характерным потрескиванием, образованием озона и высокочастотными помехами.

Появление короны свидетельствует о резкой неравномерности электрического поля и о наличии у поверхности коронирующего электрода напряженности электрического поля, достаточной для возникновения процесса объемной и поверхностной ионизации, называемой критической *Е_{кр}*.

Возникновение короны приводит к существенному выравниванию электрического поля в зоне ее действия.

В большинстве случаев корона рассматривается как вредное явление, так как она приводит к дополнительным потерям активной мощности $P_{кор}$ и энергии.

Кроме того, корона создает радиопомехи и вредно действует на изоляцию органического происхождения.

Положительную роль корона играет при возникновении грозových перенапряжений, снижая амплитуду и крутизну электромагнитных волн. Корона используется в установках по очистке дымовых газов, в установках по разделению эмульсии, в электростатических генераторах, где коронирующий электрод используется для передачи зарядов на движущуюся ленту, и т. д.

Наиболее распространенным является расчет потерь мощности на корону для линий электропередачи. При этом последовательно определяются:

а) критическая или начальная напряженность электрического поля, соответствующая появлению общей короны;

б) напряженность электрического поля, создающаяся под действием рабочего напряжения линии;

в) среднегодовые потери активной мощности на корону, расчет которых производится по аналитическим зависимостям или с использованием обобщенных характеристик для каждого элемента погоды, полученных на основе произведенных измерений (рис. 1).

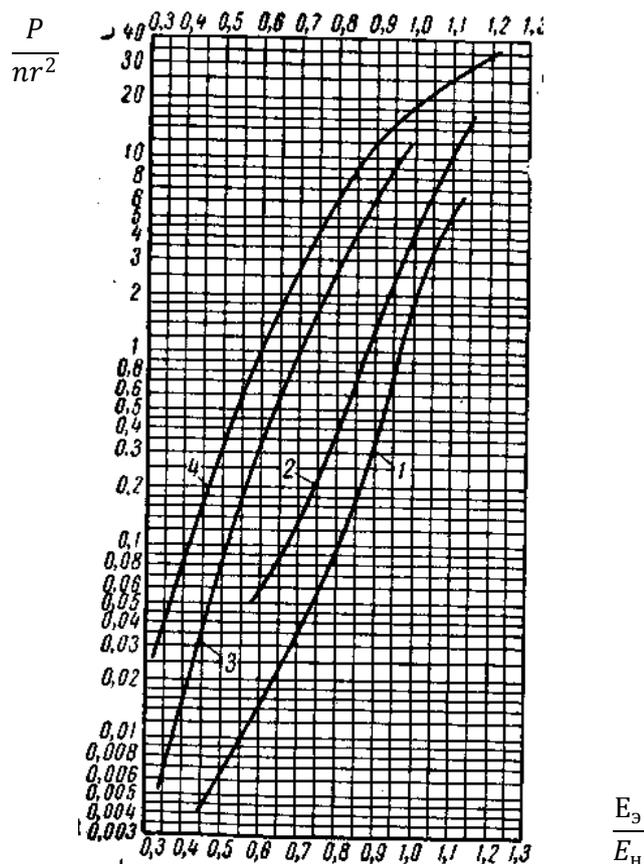


Рисунок 1 Обобщенные характеристики потерь мощности на корону при различных погодных условиях 1- хорошая погода, 2 – снег, 3 – дождь, 4 – изморозь.

Расчет по обобщенным характеристикам.

Начальная напряженность коронного разряда определяется для проводов радиусом r по формуле:

$$E_n = 24,5m\delta \left[1 + \frac{0,65}{(\delta r_0)^{0,38}} \right], \quad (1)$$

которая справедлива при отрицательной полярности провода, однако может использоваться и при положительной полярности, поскольку влияние полярности

невелико.

При малых радиусах проводов ($r_0 < 1$ см) можно использовать формулу Ф. Пика

$$E = 30,3m\delta \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{r_0\delta}}\right), \quad (2)$$

где r_0 радиус провода

$$\delta = \frac{0,386p}{273 + t}$$

p — атмосферное давление, мм рт. ст.;

t — температура, ° C;

m — коэффициент негладкости, равный 0,82 для витых проводов.

При $\delta = 1$ начальная напряженность электрического поля для проводов марки АС-240, АС-300 и АС-400 соответственно равна 31,9, 31,6 и 31,1 кВ/см.

На линиях электропередачи применяются провода, свитые из большого числа проволок. Витые провода не имеют гладкой поверхности (рис. 2), поэтому при одинаковых с гладкими проводниками напряжениях и внешних диаметрах напряженность электрического поля вблизи их поверхности бывает выше и корона возникает при меньшем напряжении. При определении начальной напряженности коэффициент гладкости m учитывает форму поверхности витого провода. Для проводов различных марок коэффициент гладкости $m = 0,82 \dots 0,94$.

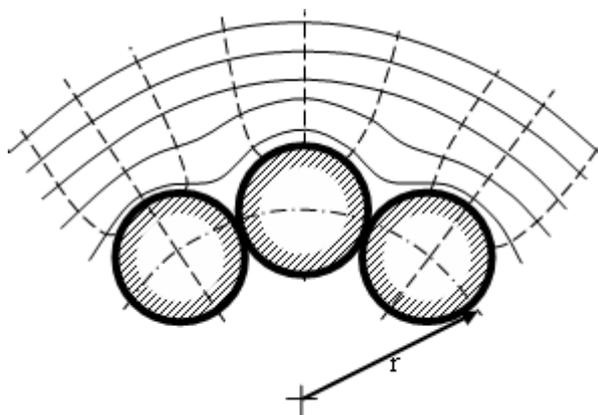


Рисунок 2. Электрическое поле у поверхности многожильного провода

При коронном разряде в результате ионизации воздуха у поверхности провода образуется объемный заряд того же знака, что и полярность напряжения на проводе (рис. 3).

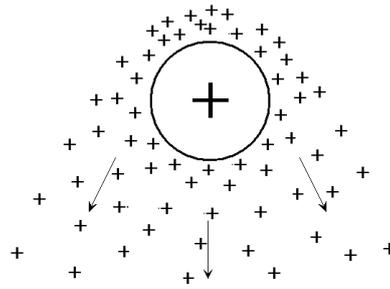


Рисунок 3. Распределение объемного заряда при униполярной короне на проводе

Напряженность поля у поверхности провода во время коронирования остается равной E_n . Увеличение напряжения па проводе приводит к усилению ионизационных процессов, росту объемного заряда и снижению напряженности до E_n .

Вследствие увеличения объемного заряда потери энергии на корону растут тем в большей степени, чем больше напряжение на проводе превосходит начальное напряжение короны:

$$U_n = E_n r \ln \frac{2H}{r}, \quad (3)$$

где H – высота одиночного провода над землей.

Так как объемный заряд при любой полярности провода перемещается от провода к земле, напряженность поля у поверхности провода стремится увеличиться. Однако из-за усиления при этом ионизации воздуха объемный заряд вблизи провода пополняется и напряженность поля в итоге сохраняется равной E_n . Таким образом, вследствие непрерывного удаления объемного заряда от провода коронный разряд может поддерживаться неограниченно долго.

Движение ионов под действием сил электрического поля образует ток в промежутке между коронирующим проводом и землей. Для передвижения ионов необходимы затраты энергии, которые и определяют в основном потери энергии на корону, поскольку затраты энергии на ионизацию воздуха меньше.

При больших диаметрах проводов напряженность электрического поля в окрестности провода уменьшается значительно медленнее, чем вблизи проводов малого диаметра. Поэтому зона ионизации – «чехол» короны – имеет большие размеры, и даже при начальном напряжении лавины могут достигать критической длины. Корона в этом случае возникает сразу в стримерной форме; структура зоны ионизации дискретна, светятся многочисленные стримерные каналы.

На проводах малых диаметров (до 1 см) корона возникает в лавинной форме. Зона ионизации достаточно однородна, свечение сосредоточено в узком чехле. Однако при

увеличении напряжения сверх начального размеры зоны ионизации возрастают, и корона из лавинной переходит в стримерную.

Ток стримерной короны состоит из отдельных импульсов с очень крутым фронтом (длительность фронта – порядка десятков наносекунд). Эта высокочастотная составляющая тока короны является источником интенсивного электромагнитного излучения с широким спектром частот, которое создает помехи радио- и телевизионному приему. При коронировании проводов линий сверхвысокого напряжения может также возникать звуковой эффект, особенно сильный при дожде.

При коронировании двух разноименно заряженных проводов (рис. 4) ионы разных знаков движутся навстречу друг другу. В области пониженной напряженности поля – посередине между проводами – происходит частичная рекомбинация ионов. Значительная же их часть проникает в зону короны противоположной полярности, усиливая там поле. В результате этого интенсивность ионизации возрастает, ток короны, а следовательно, и потери энергии увеличиваются. Такой режим коронирования называется *биполярной короной* в отличие от униполярной короны, показанной на рис. 3.

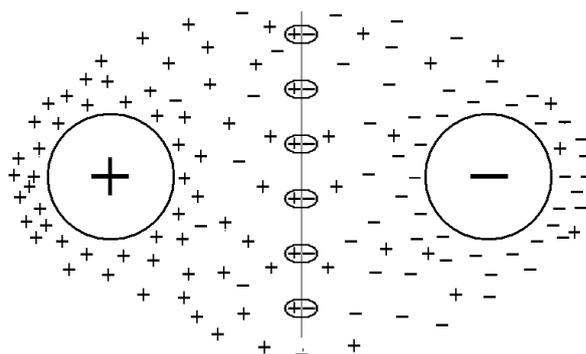


Рисунок 4. Распределение объемных зарядов при биполярной короне на проводах

При переменном напряжении корона зажигается в момент, когда напряженность поля у провода достигает значения E_n , и горит, пока напряжение не достигает максимума. После этого напряженность поля у провода становится ниже E_n и корона потухает. Поскольку ионы имеют малую подвижность, и напряженность поля у провода в каждый последующий полупериод усиливается объемным зарядом, оставшимся от предшествующего полупериода, мгновенное значение напряжения, при котором корона зажигается в каждый полупериод (напряжение зажигания), меньше начального напряжения. Зависимость напряжения зажигания от амплитуды напряжения на проводе называется характеристикой зажигания короны. Чем выше напряжение на проводе, тем больше напряжение зажигания отличается от начального. При переменном напряжении

коронирование проводов более интенсивно, чем при постоянном напряжении, и при равных условиях потери энергии на корону существенно больше.

На характеристики коронного разряда (начальное напряжение, потери энергии и радиопомехи) значительное влияние оказывают погодные условия. Атмосферные осадки усиливают напряженность электрического поля у провода, образуя на его поверхности водяные или ледяные выступы и острия. Начальное напряжение короны при этом резко снижается. Коэффициент гладкости провода должен учитывать изменение состояния провода при атмосферных осадках. Для оценки начальной напряженности по (1) можно принять коэффициент гладкости провода при инее, гололеде и изморози $m = 0,6$. В условиях дождя или снега коэффициент гладкости зависит от интенсивности осадков и принимается в пределах $m = 0,57 \dots 0,73$.

Коронный разряд на проводах линий электропередачи

Объемный заряд короны, образовавшийся в один из полупериодов переменного напряжения, за время до изменения полярности провода может переместиться на несколько десятков сантиметров. Вследствие этого объемные заряды обоих знаков совершают возвратно-поступательное движение вблизи провода, медленно удаляясь от него в область слабого поля, и там рекомбинируют. Только незначительная часть объемного заряда может дойти до проводов соседних фаз. Вследствие этого процессы коронирования каждой из фаз трехфазной линии не влияют друг на друга (эффект биполярности отсутствует), и каждая фаза может рассматриваться изолированно от других.

Пусть одна из фаз подключается к источнику в нуль напряжения (рис. 5). При увеличении напряжения на проводе возрастает также напряженность электрического поля у его поверхности. (Масштабы напряжения и напряженности E выбраны на рис. 5 так, что кривые в начальной части совпадают).

При $u = U_n$ и $E = E_n$ у провода начинается коронный разряд. Напряжение продолжает увеличиваться, а напряженность поля у поверхности провода остается постоянной и равной E_n вследствие накопления положительного объемного заряда. В момент, когда напряжение достигает амплитудного значения U_m , коронирование прекращается. И если считать, что положительный объемный заряд остается неподвижным, то напряженность поля у провода в дальнейшем снижается по синусоиде, сдвинутой на ΔU относительно приложенного напряжения.

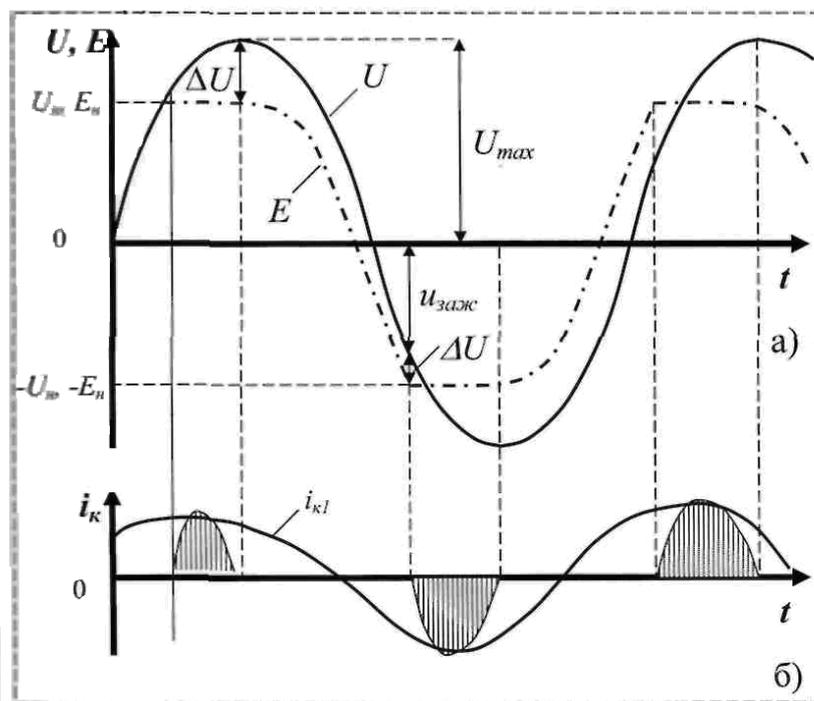


Рисунок 5. Корона при переменном напряжении: а) изменение во времени напряжения источника (U) и напряженности электрического поля на поверхности провода (E); ток короны $-i_k$ и его первая гармоника i_{k1}

Когда напряженность поля достигнет в следующий полупериод значения $-E_n$, коронирование возобновляется. Происходит это, как уже отмечалось, при напряжении зажигания $U_{зак} < U_n$. Во второй и каждый из последующих полупериодов коронирование более продолжительное, чем в первый после включения полупериод. Во второй полупериод сначала нейтрализуется положительный заряд, образовавшийся в первый полупериод, а затем в пространстве у провода накапливается отрицательный заряд. Далее процесс продолжается с переменной знаков заряда. При разложении тока короны на гармоники становится очевидным, что первая его гармоника опережает напряжение на угол, меньший 90° . Значит, ток короны имеет активную и емкостную составляющие, т.е. при короне имеют место потери энергии и увеличивается емкость провода (рис. 6).

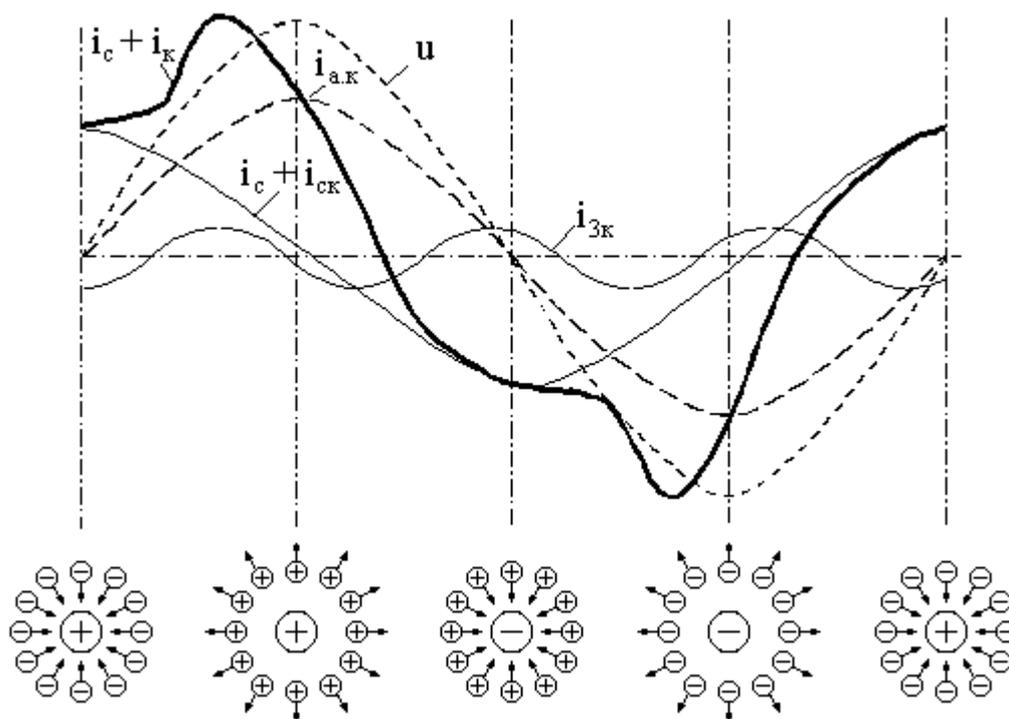


Рисунок 6. Разложение тока короны (i_k) на активную составляющую ($i_{ак}$), емкостную составляющую ($i_{ск}$) и третью гармонику ($i_{3к}$)

При увеличении амплитуды приложенного напряжения корона будет зажигаться при меньшем значении $u_{заж}$, а при значительном повышении напряжения – в нуль напряжения или даже в тот же полупериод, когда образовался объемный заряд. Последнее означает: объемный заряд так велик, что при уменьшении мгновенного значения напряжения он создает у провода напряженность поля, необходимую для возобновления процесса коронирования.

Из графика рис. 5 следует, что $U_{заж} = U_n - \Delta U$, но $\Delta U = U_{max} - U_n$, поэтому уравнение характеристики зажигания короны

$$U_{заж} = 2U_n - U_{max}. \quad (4)$$

Реальные характеристики зажигания отличаются от идеализированной. В реальных условиях при одной и той же амплитуде приложенного напряжения в положительный полупериод напряжение зажигания выше, чем в отрицательный. Это может быть связано с тем, что часть электронов не образует отрицательных ионов и покидает окрестности провода, поэтому отрицательный объемный заряд оказывается меньше, чем соответствующий положительный объемный заряд, и в меньшей степени усиливает поле у провода в положительный полупериод.

Другое отличие: реальные характеристики зажигания пересекают ось абсцисс при

$U_m > 2U_n$. Дело в том, что ионы уходят от провода, и влияние объемного заряда на напряженность поля у его поверхности снижается. Это эквивалентно уменьшению ΔU и должно приводить к возрастанию $U_{зж}$. Однако в начальной части характеристик напряжение зажигания несколько ниже, чем по (4), поскольку воздух в зоне коронирования нагревается и значение U_n понижается.

Для того чтобы исключить потери энергии на корону, а также уменьшить и радиопомехи, начальное напряжение короны должно быть не ниже наибольшего рабочего напряжения линии относительно земли. Обеспечить это соотношение надлежащим выбором диаметра проводов можно только для условий сухой погоды или используя расширенные провода (рис. 7). При атмосферных осадках исключить коронирование проводов невозможно.

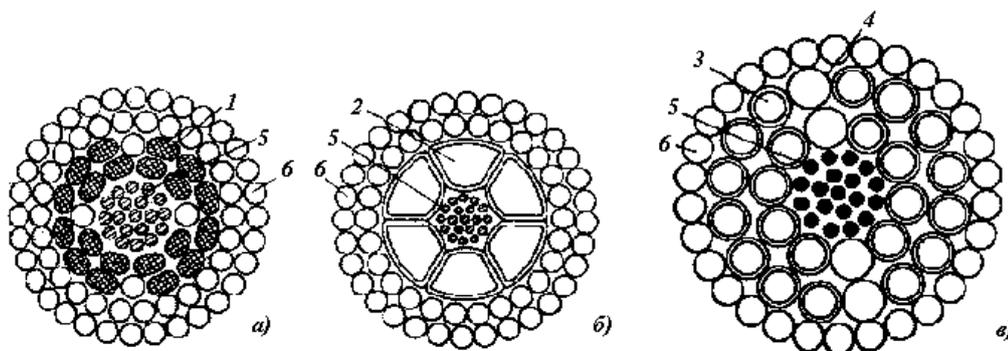


Рисунок 7. Конструкции сталеалюминевых расширенных проводов:

а – с бумажным заполнением 1; б – с секторными алюминиевыми трубками 2; в - с алюминиевыми трубками 3 и бронирующим повивом из двух алюминиевых проволок 4; 5 – стальные проволочки сердечника; 6 – алюминиевые проволоки

Поскольку сухая погода на территории России составляет 70...90 % годового времени (6000 ... 8000 ч из 8760 ч), то диаметр проводов выбирают из условий исключения короны в хорошую погоду.

Примем для упрощения выкладок $E_n = 30,3m\delta$. Тогда:

$$U_n \approx E_n r \cdot \ln \frac{2HS}{r2H} = 30,3m\delta r \cdot \ln \frac{S}{r} \quad (5)$$

где H – высота подвеса проводов;

S – среднегеометрическое расстояние между проводами.

Условие исключения короны:

$$30,3m\delta r \cdot \ln \frac{S}{r} \geq \frac{U_{ном} \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

Принимая $m = 0,8$, $\delta = 1$ и $\ln \frac{S}{r} \approx 6,2$ (характерное для линий 110...220 кВ), получаем

$$d \geq 0,011 U_{ном}. \quad (7)$$

Из (7) следует, что для линий электропередачи напряжением 110 и 220 кВ наименьшие диаметры проводов, при которых исключается корона в хорошую погоду, оставляют соответственно 1,2 и 2,4 см (при нормальных атмосферных условиях).

При номинальных напряжениях 330 кВ и выше необходимы провода еще большего диаметра, во многих случаях превышающего диаметр, выбранный из условия передачи по линии заданной мощности. В таких случаях целесообразно иметь провода, площадь поперечного сечения которых по проводящему материалу и диаметру независимы. Это так называемые расширенные провода. Они имеют диаметр, при котором обеспечивается необходимое снижение напряженности поля на их поверхности, а для сокращения площади поперечного сечения делаются полыми или со стеклопластиковой сердцевиной.

Другое решение, получившее в настоящее время широкое распространение, было предложено еще в 1910 г. акад. В. Ф. Миткевичем и заключается в применении расщепленных проводов фаз. В этом случае каждая фаза линии состоит вместо одного провода большого диаметра из нескольких параллельных проводов относительно малого диаметра. В такой конструкции фазы удается при требуемом суммарном сечении проводов существенно уменьшить максимальную напряженность поля на их поверхности. Решающим является то, что заряд каждого провода q_1 составляет только часть общего заряда расщепленной фазы

$$q_1 = q_\phi/n = C_{p.\phi} U_\phi/n, \quad (8)$$

где n – число проводов в фазе;

$C_{p.\phi}$ – емкость единицы длины расщепленной фазы;

U_ϕ – фазное напряжение.

Если провода располагаются на равных расстояниях по окружности радиусом r_p , называемым радиусом расщепления (рис. 8), то в трехфазной системе емкость расщепленной фазы определяется как

$$C_{p.\phi} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{S}{r_3}} \quad (9)$$

где S – среднегеометрическое расстояние между фазами;

$r_3 = \sqrt[n]{nr r_p^{n-1}}$ – эквивалентный радиус одиночного провода, имеющего ту же емкость, что и расщепленная фаза.

Средняя рабочая напряженность электрического поля на поверхности проводов расщепленной фазы с учетом (8) и (9) определяется как

$$E_{cp} = \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0 r} = \frac{U_\phi}{nr \cdot \ln \frac{S}{r_3}}, \quad (10)$$

а максимальная как

$$E_{max} = K_y E_{cp}, \quad (11)$$

где $K_y = 1 + (n-1) \frac{r}{r_p}$ – коэффициент, учитывающий усиление напряженности поля вследствие влияния зарядов на соседних проводах расщепленной фазы.

Наиболее существенное влияние на максимальную напряженность электрического поля оказывает радиус расщепления (рис. 8).

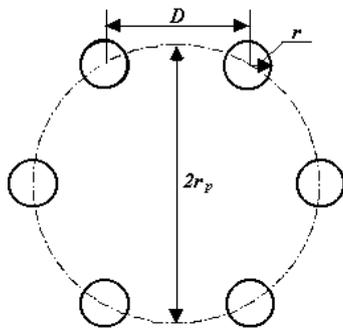


Рисунок 8. Характеристики расщепленной фазы

При увеличении r_p , с одной стороны, уменьшается влияние зарядов соседних проводов, а с другой стороны, увеличивается емкость фазы и соответственно ее заряд. Поэтому существует оптимальный радиус расщепления, при котором E_{max} наименьшая (рис. 9).

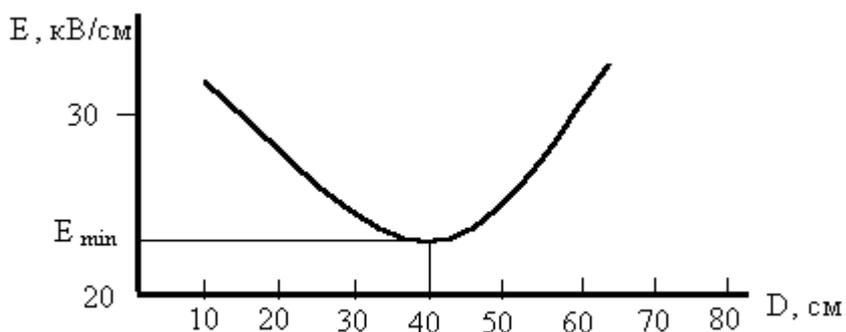


Рис. 9. Зависимость максимальной напряженности электрического поля на проводах расщепленной фазы от расстояния между проводами ВЛ 500 кВ ($n = 3$, провод АСО 500)

Потери энергии на местную корону

Увеличением диаметра проводов и снижением напряженности поля на их поверхности нельзя исключить коронного разряда при неблагоприятных атмосферных условиях. Более того, даже при хорошей погоде не может быть исключена корона, например, в местах повреждения поверхности провода и арматуры гирлянд, на элементах крепления, т.е. в точках местного усиления поля. Такую корону называют местной в отличие от общей короны, существующей на всей поверхности проводов при $E > E_n$.

Поскольку годовые потери энергии на корону составляют заметное значение и могут достигать 40% от потерь на нагрев проводов, они оказывают влияние на технико-экономические характеристики линии электропередачи и их необходимо учитывать.

Оценка потерь энергии на корону производится на основе экспериментально полученных данных. Существует несколько методов расчета потерь на местную корону. В одном из способов, разработанных во ВНИИЭ, используются обобщенные характеристики потерь для разных погодных условий. Выделяются четыре группы погоды: *хорошая погода* (без осадков); *сухой снег*; *дождь* и *мокрый снег*; *изморозь*, *гололед* и *иней*. Для трассы линии электропередачи определяются по метеорологическим данным продолжительность отдельных видов погоды в часах: хорошей погоды h_{hx} , снега h_c , дождя h_d , изморози h_u (табл. 1). Затем по отношению E_{max}/E_n из кривых (рис.1) находят удельные потери мощности для разных погодных условий, а затем среднегодовые потери энергии на корону.

Таблица 1 - Продолжительность усредненных характеристик погоды.

Группа	Годовая продолжительность		Годовые потери энергии при данной погоде общих потерь
	<i>Ч</i>	%	
Хорошая погода	7120	81,3	30
Сухой снег	800	9,1	8
Дождь	500	5,7	22
Изморозь	340	3,9	40

Теоретический анализ показывает, что потери P для одиночных проводов выражаются функциональной зависимостью:

$$\frac{P}{r_0^2 E} = F\left(\frac{E}{E_n}\right), \quad (12)$$

где r_0 – радиус провода;

E – напряженность на поверхности провода;

E_n – начальная напряженность короны.

Обработка данных, полученных на опытных пролетах на проводах различных сечений, позволила найти форму функции F :

$$\frac{P}{r_0^2 E} = a e^{-b\left(\frac{E}{E_n} - c\right)^2}, \quad (13)$$

где a, b, c – эмпирические коэффициенты.

Для расщепленных проводов расчет усложняется вследствие несимметрии поля около проводов в пучке. Напряженность поля по периметру провода изменяется согласно формуле

$$E_0 = E_{cp}(1 + A \cos \theta), \quad (14)$$

где E_{cp} – средняя напряженность поля на поверхности провода;

$$A = \beta \frac{r_0}{a} \quad (15)$$

β находится по табл. 2; r_0, a и θ показаны на рис. 10.

Таблица 2 - Значение коэффициентов β и k и эквивалентного радиуса r_s для расщепленной фазы

Число проводов в фазе n	2	3	4
Коэффициент β	2	$2\sqrt{3}$	$3\sqrt{2}$
Коэффициент k	$1 + 2\frac{r_0}{a}$	$1 + 2\sqrt{3}\frac{r_0}{a}$	$1 + 3\sqrt{2}\frac{r_0}{a}$
Эквивалентный радиус r_s	$\sqrt{r_0 a}$	$\sqrt[3]{r_0 a^2}$	$\sqrt[4]{\sqrt{2} r_0 a^3}$

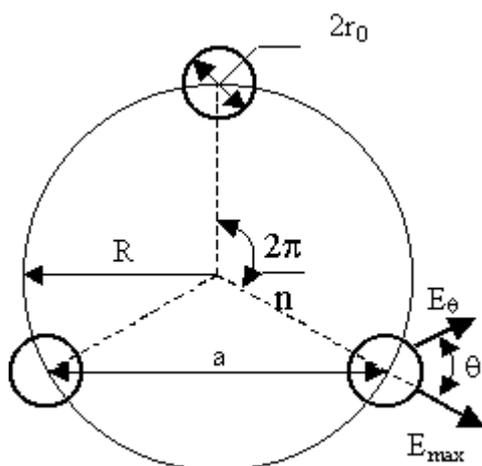


Рис. 10. Расположение расщепленных проводов в пучке

Можно, предположить, что на отрезке $dl = r d\theta$ поверхности провода корона развивается так же, как на одиночном проводе с той же напряженностью поля E_θ . Если принять указанное предположение, то потери dP_θ на участке dl , будут определяться по формуле:

$$\frac{dP}{r_0^2 E_\theta} = a e^{-b \left(\frac{E_\theta - c}{E_n} \right)^2} \frac{d\theta}{2\pi}, \quad (16)$$

откуда:

$$\frac{P}{r_0^2} = \int_0^{2\pi} \frac{dP_\theta}{r_0^2} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} a E_\theta e^{-b \left(\frac{E_\theta - c}{E_n} \right)^2} d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} a e^{-b \left(\frac{E_\theta - c}{E_n} \right)^2 + \ln E_\theta} d\theta \quad (17)$$

Для упрощения расчетов аппроксимируем функцию $-b\left(\frac{E_\theta}{E_n} - c\right)^2 + \ln E_\theta$ прямой $\alpha\frac{E_\theta}{E_n} + \beta$, где α и β находятся из условия наименьшего квадратичного отклонения кривых. Следовательно:

$$\frac{P}{r_0^2} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} a e^{\alpha\frac{E_\theta}{E_n} + \beta} d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} a' e^{\alpha\frac{E_\theta}{E_n}} d\theta \quad (18)$$

Если теперь подставить в (18) функцию $E_\theta = E_{cp}(1 + A\cos\theta)$ и учесть первые два члена разложения в ряд подынтегрального выражения, то получим:

$$\frac{P}{r_0^2} = a' \exp\left\{ \alpha \frac{E_{cp}}{E_n} + \ln \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\alpha A E_{cp}}{E_n} \right)^2 \right] \right\} \quad (19)$$

Для эквивалентного одиночного провода при аналогичных операциях, выраженных (18)...(19), имеем:

$$\frac{P}{r_0^2} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} a' E_0 e^{\alpha\frac{E}{E_n}} d\theta = a' e^{\alpha\frac{E}{E_n}} \quad (20)$$

Приравнявая (19) и (20), получаем:

$$\alpha \frac{E_\theta}{E_n} = \alpha \frac{E_{cp}}{E_n} + \ln \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\alpha A E_{cp}}{E_n} \right)^2 \right] \frac{P}{r_0^2} \quad (21)$$

откуда находим значение E_θ . Так как $x = \frac{1}{4} \left(\frac{\alpha A E_{cp}}{E_n} \right)^2 \ll 1$, то можно положить $\ln(1+x) \approx x$ и окончательно находим:

$$E_\theta = E_{cp} \left[1 + \left(\gamma \frac{A E_{cp}}{E_n} \right)^2 \right] \quad (22)$$

где $\gamma = \frac{\alpha \beta^2 r_0^2}{4a^2}$. (23)

Значение коэффициента α по опытным данным в среднем определено равным 8,7.

Из изложенного следует, что формула потерь на корону на проводе расщепленной фазы совпадает с формулой потерь на одиночном проводе при подстановке вместо E

величины $E_э$, определенной по формуле (22). Следовательно, для всех n проводов расщепленной фазы формула (13) приобретает вид:

$$\frac{P}{nr_0^2 E_э} = ae^{-b\left(\frac{E_э-c}{E_n}\right)^2} \quad (24)$$

На практике предпочитают вести расчет не по формулам, а по опытным кривым. В данной методике эти опытные кривые выражаются функциональными зависимостями:

$$\frac{P}{nr_0^2 E_э} = F\left(\frac{E_э}{E_n}\right) \quad (25)$$

Потери на корону зависят от погоды. Учитываются следующие основные виды погоды: 1) хорошая погода (без осадков); 2) дождь (включая мокрый снег); 3) снег; 4) изморозь. Функции $F_{х.н}$, $F_д$, $F_с$, $F_{из}$ для указанных видов погоды построены на рис. 1. Кривые на рис.1 построены как средние по опытным точкам (на рисунке не показаны) для проводов различных сечений и число проводов в пучке равно 1, 2, 3, 4. Для плохой погоды (дождь, снег, изморозь) разброс опытных точек относительно кривых незначителен. Это показывает, что выбранные критериальные координаты, в частности величина $E_э$, хорошо отображают физические процессы, определяющие потери на местную корону. Для хорошей погоды, при которой потери вообще малы, наблюдается существенный разброс опытных точек, в связи с чем оказалось необходимым построить кривые для n , равного 1, 2, 3, 4.

Отметим, что при определении потерь в условиях хорошей погоды начальная напряженность E_n определяется по формуле (2) для действительной плотности воздуха δ в данном районе. В условиях плохой погоды E_n также вычисляется по формуле (2), но в этой формуле полагается $\delta = 1$, поскольку коронные потери при этих видах погоды мало зависят от давления и температуры воздуха.

Так как потери на корону зависят не только от вида погоды, но и от интенсивности осадков, то кривые на рис. 1 дают усредненные значения при погоде данного вида. На коронные потери, в частности при изморози, оказывает влияние также токовая нагрузка линии, подсушивающая провода, однако количественные сведения об этом влиянии недостаточны. Поэтому влияние токовой нагрузки не учитывают.

Дальнейший расчет основывается на продолжительности в году различных групп погоды. Обозначим эти продолжительности через $T_{х.н}$, $T_д$, $T_с$, $T_{из}$ в часах соответственно для хорошей погоды, дождя, снега, изморози. В среднем при типовом проектировании

линий в районах с умеренным климатом можно принять продолжительность хорошей погоды $T_{x.n} = 7235$ ч, дождя и мокрого снега $T_{\delta} = 500$ ч, снега $T_c = 800$ ч, изморози $T_{uz} = 225$ ч.

Среднегодовые потери мощности на корону трехфазной линии определяются суммированием потерь при различных погодах по следующей формуле

$$P_{\kappa} = \frac{nr^2}{8760} \left\{ \left[\sum_{i=1,2,3} F_{x.n} \left(\frac{E_{i\delta}}{E_n} \right) E_{i\delta} \right] \delta^2 T_{x.n} + \left[\sum_{i=1,2,3} F_{\delta} \left(\frac{E_{i\delta}}{E_{n,\delta=1}} \right) E_{i\delta} \right] \delta^2 T_{\delta} + \right. \\ \left. + \left[\sum_{i=1,2,3} F_c \left(\frac{E_{i\delta}}{E_{n,\delta=1}} \right) E_{i\delta} \right] \delta^2 T_c + \left[\sum_{i=1,2,3} F_{uz} \left(\frac{E_{i\delta}}{E_{n,\delta=1}} \right) E_{i\delta} \right] \delta^2 T_{uz} \right\}, \text{ кВт/км.} \quad (26)$$

В этой формуле $E_{1\delta}, E_{2\delta}, E_{3\delta}$ – эквивалентные напряженности электрического поля на поверхности проводов фаз 1, 2, 3. Функции $F_{x.n}, F_{\delta}, F_c, F_{uz}$ находятся по кривым рис. 9 в зависимости от значений $E_{i\delta}/E_n$.

Имеется упрощенная формула определения потерь на корону

$$A = n^2 r^2 (P_{x.n} T_{x.n} + P_{\delta} T_{\delta} + P_c T_c + P_u T_{uz}),$$

где n – общее число проводов в трех фазах линии;

r – радиус проводов;

$P_{x.n}, P_{\delta}, P_c, P_u$ – удельные потери на корону при различных видах погоды.

Среднегодовая мощность потерь на корону, кВт/км, равна:

$$P_{c.m} = P_{\kappa}/8760. \quad (27)$$

Усредненные данные по погодным условиям для средней полосы европейской части России и Западной Сибири приведены в табл. 1. Продолжительность изморози невелика, однако потери энергии при ней составляют значительную часть среднегодовых потерь.

В оценочных расчетах потерь энергии на корону начальная напряженность для расщепленных проводов определяется по (1), а максимальная рабочая – по (10) и (11). Для одиночных проводов фаз начальная напряженность короны определяется по (1), а рабочая напряженность электрического поля – по (10) при $n = 1$ и $r_s = r_0$. Напряженности рассчитываются в амплитудных значениях.

В технико-экономических расчетах рекомендуется учитывать потери на корону, если $E_{max}/E_n \leq 0,5$. Экономически приемлемые потери мощности на корону имеют место при

$$E_{max}/E_n \geq 0,9, \quad (28)$$

и это соотношение является определяющим при выборе проводов линий электропередачи

по условию ограничения потерь на корону.

Экологическое влияние коронного разряда

Коронный разряд на линиях электропередачи создает помехи радио- и телевизионному приему, а также акустический шум. Основная причина радиопомех и шума – стримерная корона на проводах. Поскольку наиболее благоприятные условия для возникновения стримерной короны складываются при различных осадках, когда значительно снижается начальная напряженность поля, а также при применении проводов большого диаметра, наиболее сильные радиопомехи и акустический шум возникают при коронировании линий сверхвысокого напряжения во время дождя и снега. В хорошую погоду помехи возрастают при загрязнении проводов.

Спектр частот излучения, создающего радиопомехи, охватывает диапазон от 10 $\kappa\Gamma\text{ц}$ до 1 $\Gamma\Gamma\text{ц}$. Помехи на частотах выше 30 $\text{M}\Gamma\text{ц}$ оказывают мешающее влияние на телеприем и возникают только при коронировании линий 750 $\kappa\text{В}$. Источниками помех в этом случае помимо короны на проводах служат частичные разряды в зазорах и трещинах изоляторов и корона на заостренных элементах арматуры. В хорошую погоду корона на проводах практически не создает помех телевизионному приему.

Интенсивность радиопомех характеризуется вертикальной составляющей напряженности электрического поля вблизи поверхности земли (E_2). Уровень радиопомех, дБ , определяется величиной

$$Y = 10 \lg \left(\frac{E_2}{E_1} \right)^2 = 20 \lg \frac{E_2}{E_1}, \quad (29)$$

где E – напряженность электрического поля, мкВ/м .

Обычно за базовое значение принимают $E_1 = 1 \text{ мкВ/м}$, тогда

$$Y = 20 \lg E. \quad (30)$$

В качестве расчетной частоты по рекомендации Международного комитета по радиопомехам принимается 0,5 $\text{M}\Gamma\text{ц}$. Уровень полезного сигнала при этой частоте составляет примерно 60 дБ . Радиоприем считается удовлетворительным, если полезный сигнал превышает помехи на 20 дБ . Поэтому допустимый уровень радиопомех в хорошую погоду составляет 40 дБ , что в соответствии с (29) дает $E = 100 \text{ мкВ/м}$. Это значение напряженности электрического поля радиопомех принято в качестве допустимого на расстоянии 100 м от проекции на землю крайнего провода линии электропередачи напряжением 330 $\kappa\text{В}$ и выше.

По мере удаления от линии уровень помех снижается. Между уровнями

радиопомех Y_4 и Y_2 на расстояниях соответственно l_1 и l_2 существует зависимость

$$Y_2 - Y_1 = 20k \lg \frac{l_1}{l_2}, \quad (31)$$

где k – коэффициент затухания, равный 1,6 в диапазоне частот 0,15...1 МГц.

Зависимость между уровнем радиопомех и напряженностью электрического поля на поверхности проводов линейна и выражается эмпирической формулой:

$$Y_2 - Y_1 = k_1(E_2 - E_1), \quad (32)$$

где Y_2 и Y_1 – уровни радиопомех, дБ, при напряженностях на проводах E_1 и E_2 , кВ/см;

k_1 – коэффициент, равный 1,8 при напряженностях поля на проводах 20...30 кВ/см.

Увеличение радиуса проводов при неизменной напряженности поля на них приводит к росту уровня радиопомех, поскольку спад напряженности поля у провода в радиальном направлении при этом замедляется и создаются условия для развития более интенсивной стримерной короны. Связь между уровнями радиопомех и радиусами проводов устанавливается эмпирической формулой:

$$Y_2 - Y_1 = 20 \lg \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2. \quad (33)$$

Радиопомехи практически не зависят от числа составляющих проводов расщепленной фазы, поскольку происходит взаимное электромагнитное экранирование проводов фазы.

Уровень радиопомех уменьшается с ростом частоты излучения. В диапазоне 0,15...5 МГц уровень радиопомех на различных частотах Y_f по отношению к их уровню на частоте 0,5 МГц определяется, дБ, по уравнению:

$$Y_f = 5,5[1 - 2(\lg 10f)^2], \quad (34)$$

где f – частота излучения, МГц.

Если известны уровень радиопомех Y_1 на нормированном расстоянии от линии и параметры E_1 и r_1 тщательно исследованной базовой линии электропередачи, то уровень радиопомех при хорошей погоде Y_2 , создаваемый другой линией, например проектируемой с параметрами E_2 и r_2 , может быть с учетом (32) и (33) определен по обобщенной формуле:

$$Y_2 = Y_1 + 1,8(E_2 - E_1) + 40 \cdot \lg \frac{k_2}{k_1}. \quad (35)$$

Подставив в (34) нормированное значение Y_2 и параметры базовой линии, получим зависимость амплитудного значения допустимой напряженности поля на поверхности

проводов, при которой обеспечивается нормированный уровень радиопомех, в виде

$$E_{don} = 32 - 17,4 \lg k. \quad (36)$$

Акустический шум возникает, главным образом, в плохую погоду, когда усиливается интенсивность коронирования проводов. Звуковой эффект при этом имеет две составляющие: 1) шипение, соответствующее частоте 100 Гц и кратным ей частотам; 2) широкополосный шум. Первая составляющая обусловлена движением объемного заряда у проводов, что дважды за период создает волны звукового давления. Вторая генерируется стримерной короной.

Уровни громкости шумов [дБ (А)] измеряются с применением корректирующих фильтров, которые позволяют учесть физиологические особенности органов слуха человека (псофометрическую характеристику).

Особенно интенсивный шум от короны возникает при сильном дожде, однако такой дождь сам создает шум, превышающий по громкости возможные акустические помехи от линии электропередачи. Поэтому более существенны помехи при морозящем дожде, в туман, при мокрых проводах после сильного дождя. Уровень громкости в этих случаях на 5...6 дБ (А) ниже, чем в сильный дождь, но значительно превышает общий звуковой фон. Оценка акустического шума делается по условиям «влажных» проводов.

По санитарным нормам, допустимый уровень громкости равен 45 дБ (А). Линии сверхвысокого напряжения не приближаются к границам населенных пунктов ближе, чем на 300 м, а на таком расстоянии уровни громкости при влажных проводах ниже допустимого значения.

Для оценки громкости при дожде может быть использована эмпирическая формула:

$$A = 16 + 1,14 E_{max} + 9r + 15 \lg n - 10 \lg l, \quad (37)$$

где A – уровень громкости, дБ (А);

r – радиус провода, см;

E_{max} – максимальная напряженность поля на поверхности проводов, кВ/см;

n – число проводов в расщепленной фазе;

l – расстояние от крайней фазы, м.

Для чистых районов допустимые напряженности определяются потерями энергии на корону при $d < 3,26$ см и акустическими помехами при $d > 3,26$ см. В районах с промышленным загрязнением допустимые напряженности определяются потерями энергии при $d < 2,7$ см, радиопомехами при $d = 2,7...3,3$ см и акустическим шумом при $d > 3,3$ см.

Интенсивность акустических помех существенно возрастает при увеличении числа проводов в фазе, вследствие чего допустимая напряженность электрического поля на поверхности проводов снижается.

Примеры решения задач

Задача 1 Определить среднегодовые потери мощности на корону для одноцепной линии с проводами ЗхАСУ-240/300 при напряжении 330 кВ. Линия имеет горизонтально расположенные провода с расстоянием между ними 10,5 м и два троса. Средняя высота подвеса провода над землей 13 м, радиус провода 1,12 см, шаг расщепления 300 мм. Длительность хорошей погоды $T_x = 7000$ ч, длительность дождя, снега, изморози $T_d = 1760$ ч.

Решение:

Расчет произведем с помощью обобщенных характеристик. Эквивалентный радиус расщепленного провода определим из выражения (9):

$$r_{\text{экв}} = \sqrt[3]{1,12 \cdot 30^2} = 10 \text{ см}$$

Рабочую напряженность электрического поля вблизи провода определим из формулы (10), откуда с учетом числа проводов в каждой фазе получим:

$$E = \left(1 + 2 \cdot \frac{1,12}{30}\right) \frac{330}{3 \cdot 1,12 \cdot \ln \cdot \frac{1050}{10}} = 22,68$$

Начальное напряжение коронирования для провода АСУ-240 равно 31,8 кВ/см. Используя эту величину, найдем отношение рабочей напряженности электрического поля к начальной для каждого провода:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{22,68}{31,8} = 0,71$$

Из обобщенных характеристик имеем функции: для хорошей погоды

$$F_x \left(\frac{E}{E_0}\right) = F_x(0,71) = 0,032$$

для дождливой погоды

$$F_d \left(\frac{E}{E_0}\right) = F_d(0,71) = 0,15$$

Из зависимости (67) определим потери за год

$$P_k = \frac{3 \cdot 1,12^2}{8760} [(0,032 \cdot 22,68) \cdot 7000 + (0,15 \cdot 22,68) \cdot 1760] = 4,73 \text{ кВт/км}$$

Ответ 4,73 кВт/км

ПРИМЕРЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Пример 1. Определить среднегодовые потери активной мощности на корону для линии напряжением 525 кВ, выполненной проводом 2хАСУ-240/300, если продолжительность ясной погоды $T_x=7000$ ч, а ненастной погоды $T_d=1760$ ч. Расположение проводов горизонтальное с расстоянием между ними 10,5 м. Средняя высота подвеса провода 13 м, шаг расщепления 30 см, относительная плотность воздуха 1. Радиус провода 1,12 см. Расчет произвести с помощью обобщенных характеристик.

Пример 2. Определить потери мощности на корону для линии протяженностью 100 км с рабочим напряжением 230 кВ, если расстояние между проводами 4 м, радиус провода 0,95 см. Провода марки АС-185 расположены в горизонтальной плоскости с расстоянием между ними 7 м. Погода ясная, атмосферные осадки нормальные, коэффициент негладкости провода 0,85 и относительная плотность воздуха 0,9. Погода ясная. Для расчета воспользоваться формулой Пика.

Пример 3. Определить потери мощности на корону для линии протяженностью 100 км с рабочим напряжением 220 кВ, если расстояние между проводами 4 м, диаметр провода 24,2 мм. Провода марки АС-300 расположены в горизонтальной плоскости с расстоянием между ними 7 м. Погода ясная, атмосферные осадки нормальные, коэффициент негладкости провода 0,85 и относительная плотность воздуха 0,9. Погода ясная.

Практическая работа № 2

Выбор числа изоляторов в гирлянде

Краткие теоретические сведения

В современной энергетике передача электроэнергии от мест её производства к потребителям осуществляется по воздушным линиям электропередачи (ЛЭП) напряжением до 750 кВ и выше. Большое значение имеет надежность работы линий электропередачи. В значительной мере решение этой задачи обеспечивается надежной работой изоляции электрических систем и оборудования, в частности правильным выбором типа изоляторов на проектируемой линии.

Самыми распространенными изоляторами, в настоящее время, являются стеклянные. Это объясняется тем, что изоляторы из закаленного стекла имеют ряд преимуществ перед фарфоровыми: технологический процесс их изготовления может быть полностью автоматизирован и механизирован; прозрачность стекла позволяет легко обнаружить при внешнем осмотре мелкие трещины и различные внутренние дефекты; применение стеклянных изоляторов позволяет отказаться от проведения в процессе эксплуатации периодических профилактических испытаний гирлянд под напряжением, так как каждое повреждение закаленного стекла приводит к разрушению изолирующей тарелки, которое легко обнаружить при обходе линии электропередачи эксплуатационным персоналом.

Принято считать, что основными недостатками стеклянных изоляторов являются ненадежная транспортировка, недостаточная антивандальная устойчивость и низкая ударопрочность. Под проблемой антивандализма скрывается невозможность стеклянных изоляторов противостоять расстрелам, точнее преднамеренной стрельбе по ним оружием. Но по свидетельским данным персонала, эксплуатирующего данный вид изолятора эта проблема является сильно преувеличенной. Гирлянда с полным отсутствием изоляторов или частично в большом количестве осыпавшимися изоляторами явление довольно редкое. В большинстве случаев это отсутствие в гирлянде одного, реже двух рядом расположенных стеклянных изоляторов. Это можно объяснить тем, что на расстоянии 30-40 метров охотничья дробь рассеивается в диаметре около одного метра. Но при более точном выстреле вероятность повреждения более двух изоляторов довольно высокая. В то же время, производить осмотр подвергшихся «расстрелам» полимерных изоляторов необходимо с применением специальных оптических приборов, позволяющих рассмотреть с земли и обнаружить повреждения, практически очень сложно. Также существует большая проблема диагностики полимерных подвесных изоляторов

нерешенная в мире до сих пор. Все это дает аргументы в пользу применения стеклянных изоляторов.

Для воздушных линий напряжением 35 кВ с проводами средних и больших сечений, а также для линий более высокого напряжения применяют только **подвесные изоляторы**.

Подвесные изоляторы состоят из фарфоровой или стеклянной изолирующей части и металлических деталей – шапок и стержней, соединяемых с изолирующей частью посредством цементной связки.

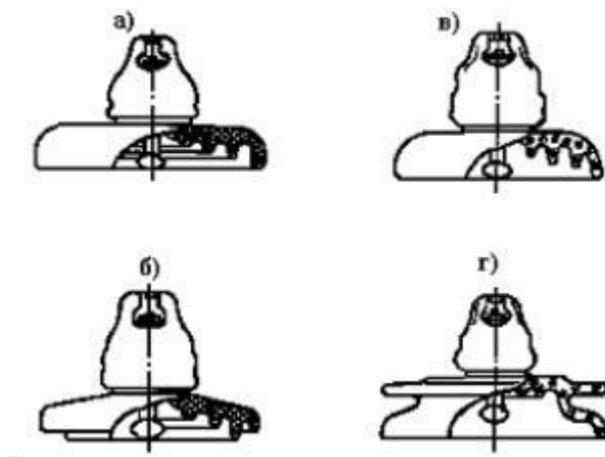


Рис. 1. Подвесные изоляторы ВЛ: а – ПФ70-В, ПФ160-А, ПФ210-А, б – ПФГ70-Б, в – ПС70-Д, ПС120-А, ПС160-Б, ПС300-Б, г – ПСГ70-А и ПСГ120-А.

Для разных условий по загрязненности окружающей среды применяются **тарельчатые изоляторы разных типов**, отличающихся друг от друга основными характеристиками: длиной пути тока утечки и испытательным напряжением. **Подвесные изоляторы собираются в гирлянды, которые бывают поддерживающими и натяжными.** Поддерживающие гирлянды изоляторов монтируются на промежуточных опорах, подвесные – на анкерных (рис. 3).

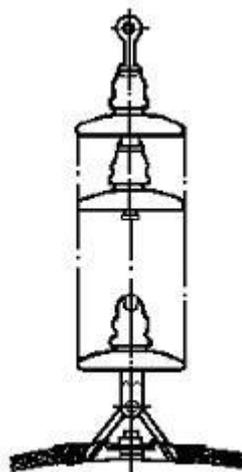


Рис. 2. Гирлянда из подвесных изоляторов

Количество изоляторов в гирлянде зависит от рабочего напряжения линии, степени загрязненности атмосферы, материала опор и типа применяемых изоляторов. Так, для линии напряжением 35 кВ – 2-3, для 110 кВ – 6-7, для 220 кВ- 12-14 и т.д.

Подвесные стеклянные изоляторы ПС-40 используются на ВЛЭП напряжением 6-35 кВ, при нагрузках не превышающих нормированную 40 кН.

Подвесные стеклянные изоляторы ПС-70 используются на ВЛЭП напряжением 35-220 кВ, при нагрузках не превышающих нормированную 70 кН.

Подвесные стеклянные изоляторы ПС-120 используются на ВЛЭП напряжением 35-330 кВ, при нагрузках не превышающих нормированную 120 кН.

Подвесные стеклянные изоляторы ПС-160Д используются на ВЛЭП напряжением 110-500 кВ, при нагрузках не превышающих нормированную 160 кН.

Подвесные стеклянные изоляторы ПС-210Б используются на ВЛЭП напряжением 110-750 кВ, при нагрузках не превышающих нормированную 210 кН.

Подвесные стеклянные изоляторы ПС-300Б используются на ВЛЭП напряжением 110-750 кВ, при нагрузках не превышающих нормированную 300 кН.

Подвесные стеклянные изоляторы ПС-400Б используются на ВЛЭП напряжением 330-750 кВ, при нагрузках не превышающих нормированную 400 кН.

Подвесные стеклянные изоляторы ПСД-70Е используются на ВЛЭП напряжением 35-220 кВ, при нагрузках не превышающих нормированную 70кН. Изоляторы имеют увеличенную длину пути утечки благодаря изоляционной детали с двойным ребром.

Подвесные стеклянные изоляторы ПСВ-120Б используются на ВЛЭП напряжением 110-500 кВ, при нагрузках не превышающих нормированную 120 кН. Изоляторы имеют увеличенную длину пути утечки благодаря вытянутым формам ребер.

Подвесные стеклянные изоляторы ПСВ-160Б используются на ВЛЭП напряжением 220-750 кВ, при нагрузках не превышающих нормированную 160 кН. Изоляторы имеют увеличенную длину пути утечки благодаря вытянутым формам ребер.

Подвесные стеклянные изоляторы ПСС-120Б используются на ВЛЭП напряжением 35-220 кВ, при нагрузках не превышающих нормированную 120 кН. Изоляторы имеют специальную форму изоляционной детали. Сферическая форма позволяет изолятору лучше работать в условиях пустыни, степи и открытых пространств с большой ветровой нагрузкой благодаря лучшей само очистке изолятора.

Подвесные стеклянные изоляторы ПСС-210Б используются на ВЛЭП напряжением 220-500 кВ, при нагрузках не превышающих нормированную 210 кН. Изоляторы имеют специальную форму изоляционной детали. Сферическая форма позволяет изолятору лучше работать в условиях пустыни, степи и открытых пространств с большой ветровой нагрузкой благодаря лучшей само очистке изолятора.

Подвесные стеклянные изоляторы ПСК-300А используются на ВЛЭП напряжением 500-1150 кВ, при нагрузках не превышающих нормированную 300 кН. Изоляторы имеют специальную форму изоляционной детали. Коническая форма позволяет изолятору лучше работать в условиях пустыни, степи с большой ветровой нагрузкой благодаря лучшей само очистке изолятора.

Подвесные стеклянные изоляторы ФОГ-70, ФОГ-120, ФОГ-160 используются на ВЛЭП напряжением 35-220 кВ, при нагрузках не превышающих нормированную 70, 120, 160 кН соответственно. Изоляторы имеют специальное гидрофобное покрытие. Благодаря ему изолятор сохраняет все положительные характеристики традиционного изолятора из закаленного стекла и приобретает все положительные качества силиконовых крекингостойких гидрофобных изоляторов.

Число изоляторов в гирлянде рассчитывается согласно [19] по номинальному напряжению, длине пути утечки изолятора, коэффициенту эффективности, степени загрязнения района.

$$I_{эф} = \frac{I_{из}}{K},$$
$$n_{из} = \frac{I_0 U_{п}}{I_{эф}},$$

где $I_{из}$ - длина пути утечки выбранного изолятора по каталожным данным; K - коэффициент эффективности использования пути утечки (задается в каталоге изоляторов).

Uл - наибольшее линейное напряжение данного класса изоляции (принимается 1.1 Uном);

Ю - рекомендуемая удельная длина пути утечки в зависимости от района загрязнения [19]

Степень загрязнения	1	2	3	4	5	6
Путь утечки мм/кВ	13	15	18	22.5	30	35

Для многоцепных гирлянд Ю увеличивается на 5%. Для натяжных гирлянд (на анкерных опорах) количество изоляторов увеличивается на Δn [2]

Uном	35-220 кВ	330 кВ	500 кВ	750 кВ
Δn	1	2	3	4

Пример решения задач

Задача 1

Номинальное напряжение $U_{ном} = 150 \text{ кВ}$;

Степень загрязнения: 1.

Район по гололеду: II.

Найти количество изоляторов в гирлянде

Решение:

Нормированная удельная эффективная длина пути утечки для воздушной линии при номинальном напряжении 110-220 кВ и степени загрязнения равной:

$$\lambda_{эф} = 1,3 \text{ см/кВ}$$

Для линии с номинальным напряжением равным 150 кВ наибольшее рабочее напряжение равно 172,5 кВ.

$$U_{наиб.раб.} = 1,15 \cdot U_{ном} = 1,15 \cdot 150 = 172,5 \text{ кВ}$$

Для **нормальной работы гирлянды** необходимо выполнение условия:

$$L_y \geq K \cdot \lambda_{эф} \cdot U_{наиб.раб.}$$

Здесь коэффициент пропорциональности K равен:

$$K = K_{но} \cdot K_{э} \cdot K_{к}$$

Коэффициент $K_{ю}$ учитывает высоту расположения изолятора над уровнем моря, и при высоте, меньше 1000 м., принимается равным 1.

Коэффициент $K_э$ учитывает эффективность формы изолятора:

$$K_э = 1.0 + 0.5 \cdot \left(\frac{L_{y1}}{D} - 1 \right)$$

Здесь L_{y1} — геометрическая длина пути утечки одного изолятора, D — диаметр изолятора.

Изолятор ПС120-А подходит для нашей конструкции, т. к. может выдержать электромеханическую нагрузку более 80 кН. Его диаметр $D = 255$ мм, а длина утечки $L_{y1} = 340$ мм.

$$K_э = 1.0 + 0.5 \cdot \left(\frac{L_{y1}}{D} - 1 \right) = 1.0 + 0.5 \cdot \left(\frac{340}{255} - 1 \right) = 1.167$$

Коэффициент K_k учитывает конструкцию использования изолятора и для простейшей из них принимается равной 1.

Таким образом:

$$L_y \geq K \cdot \lambda_{эф} \cdot U_{наиб.раб.} = 1.167 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1.3 \cdot 172.5 = 261.7 \text{ см}$$

Следовательно, гирлянда изоляторов будет насчитывать:

$$n \geq \frac{K \cdot \lambda_{эф} \cdot U_{наиб.раб.}}{L_{y1}} = 9.$$

Рассмотрим работу полученной гирлянды изоляторов под дождем при воздействии внутренних перенапряжений. Для нормальной работы гирлянды в данном режиме необходимо выполнение условия:

$$n \geq \frac{K_p \cdot U_{наиб.раб.}}{\sqrt{3} \cdot E_{мп} \cdot H}$$

K_p - допустимая кратность перенапряжений (зависит от номинального напряжения).

Для номинального напряжения равного 150 кВ. $K_p = 3$.

$E_{мп}$ - расчетная средняя мокроразрядная напряженность. $E_{мп} = 2,3$ кВ/см.

H - строительная высота. Для нашего изолятора $H = 146$ мм.

Это условие выполняется при количестве изоляторов равном 9.

Для линий 110-220 кВ для нормальной работы гирлянды необходимо увеличить число изоляторов на один, следовательно $n = 10$.

Рассчитаем число изоляторов в гирлянде для второй линии, подходящей к подстанции.

Для линии с номинальным напряжением равным 110 кВ наибольшее рабочее напряжение равно 126,5 кВ.

$$U_{\text{наиб.раб.}} = 1,15 \cdot U_{\text{ном}} = 1,15 \cdot 110 = 126,5 \text{ кВ}$$

Для нормальной работы гирлянды необходимо выполнение условия:

$$L_y \geq K \cdot \lambda_{\text{эф}} \cdot U_{\text{наиб.раб.}}$$

$$K_y = 1,0 + 0,5 \cdot \left(\frac{L_{y1}}{D} - 1 \right) = 1,0 + 0,5 \cdot \left(\frac{340}{255} - 1 \right) = 1,167$$

$$K = K_{\text{ню}} \cdot K_y \cdot K_{\text{к}} = 1,167 \cdot 1 \cdot 1 = 1,167$$

$$L_y \geq K \cdot \lambda_{\text{эф}} \cdot U_{\text{наиб.раб.}} = 1,167 \cdot 1,3 \cdot 126,5 = 191,913 \text{ см}$$

Следовательно, гирлянда изоляторов будет насчитывать:

$$n \geq \frac{K \cdot \lambda_{\text{эф}} \cdot U_{\text{наиб.раб.}}}{L_{y1}} = \frac{191,913}{34} \approx 6.$$

Рассмотрим работу полученной гирлянды изоляторов под дождем при воздействии внутренних перенапряжений. Для нормальной работы гирлянды в данном режиме необходимо выполнение условия:

$$n \geq \frac{K_p \cdot U_{\text{наиб.раб.}}}{\sqrt{3} \cdot E_{\text{мп}} \cdot H} = \frac{3 \cdot 126,5}{\sqrt{3} \cdot 2,3 \cdot 0,146} \approx 7$$

Для линий 110-220 кВ для нормальной работы гирлянды необходимо увеличить число изоляторов на один, следовательно $n = 8$.

Задачи для самостоятельной работы

Пример 1. ЛЭП-35 на деревянных опорах проложена в лесотундровой зоне. Определить количество изоляторов типа ПС6-А в поддерживающих и натяжных гирляндах.

Пример 2. Выбрать тип и количество изоляторов в поддерживающих и натяжных гирляндах ЛЭП-110 на металлических опорах, проходящей вблизи морского побережья по солончаково-пустынной территории.

Пример 3. Определить количество изоляторов типа ПСГ12-А в поддерживающих и натяжных гирляндах ЛЭП-220 на железобетонных опорах, проходящей вблизи азотно-тукового завода производительностью $P=4 \cdot 10^6$ т год, расположенного в солончаково-пустынной местности.

Пример 4. ЛЭП-500 на металлических опорах оснащена изоляторами типа ПС 12-А. Определить их количество в поддерживающих и натяжных гирляндах, если район, по которому проходит ЛЭП, отнесен к третьей степени загрязнения атмосферы.

Пример 5. Определить расчетное количество изоляторов типа ПФГ6-1 в поддерживающих и натяжных гирляндах ЛЭП-110 на деревянных опорах. ЛЭП проложена в местности с 4-той степенью загрязненности атмосферы.

Практическая работа № 3

Расчет изоляции кабельных линий

Краткие теоретические сведения

Кабель силовой предназначен для передачи электрической энергии от различных источников к потребителям. Бывает кабель низкого, среднего и высокого напряжения. В зависимости от целей использования силового кабеля различается и его конструкция.

Силовой кабель многообразен - это и высокотехнологичное сложное изделие со многими элементами в конструкции и достаточно простой продукт, содержащий три основных элемента - жилу, изоляцию и оболочку.

Современные кабели производятся с изоляцией из сшитого полиэтилена и используются в сетях различного класса напряжения (до 500 кВ). Применение сшитого полиэтилена обеспечивает высокие диэлектрические свойства изоляции, высокие механические свойства, более высокие по сравнению с бумажно-масляной изоляцией термические режимы, надёжность и долговечность кабелей [2].

Обзор существующих конструкций высоковольтных кабелей

Классификация силовых кабелей

Силовой кабель - это несколько изолированных проводов в защитной герметичной оболочке, предназначенный для передачи и распределения электроэнергии трансформаторных подстанций к коммунальным и транспортным объектам, к промышленным предприятиям и т.п. Кабели по признакам материала проводящих жил передаваемой энергии или информации делят на две группы:

- электрические кабели с металлическими жилами;
- кабели с оптическими волокнами.

Кабели с оптическими волокнами могут иметь и дополнительные металлические токопроводящие жилы.

Электрические кабели с металлическими жилами классифицируют по порядку передаваемой через кабели мощности, величине напряжения, типу изоляции, назначению и т.д. В соответствии с этим различают: силовые кабели низкого, среднего и высокого напряжения; силовые гибкие кабели; кабели управления; контрольные кабели; низковольтные провода и шнуры; кабели и провода связи; радиочастотные кабели; специальные кабели и др. Силовые кабели предназначены для передачи и распределения электрической энергии [1].

По типу изоляции силовых кабелей различают:

силовые кабели с бумажной изоляцией, в том числе пропитанные и маслonaполненные;

силовые кабели с пластмассовой изоляцией;

силовые кабели с резиновой изоляцией.

Силовые кабели с пластмассовой изоляцией предназначены для передачи и распределения электроэнергии в стационарных кабельных ЛЭП на номинальном переменном напряжении 0,66; 1; 3; 6; 10 и 110 кВ. Кабели выпускаются с алюминиевыми и медными жилами, с пластмассовой изоляцией жил, в пластмассовой оболочке, с защитными волокнистыми покровами, броней, в стальной гофрированной оболочке, а также без защитных покровов и без брони.

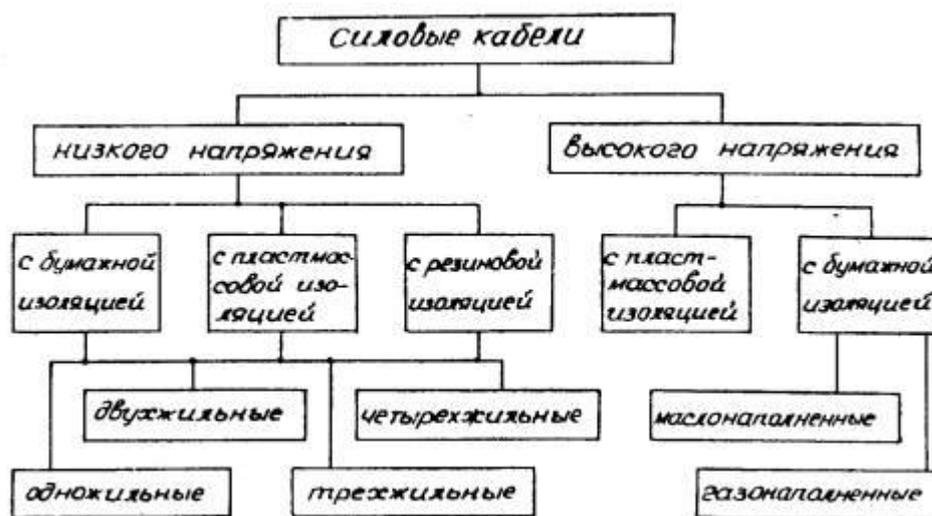


Рисунок 1. Классификация силовых кабелей

Наибольшее применение получили кабели низкого напряжения общего назначения следующих марок: АПВГ, АВВГ, ВВГ, АВВГз, ВВГз, АВБбШв, ВБбШв. Кабели марок АВВГ-С, АПВГ-С и АПсВГ используются в сельской местности для передачи и распределения электроэнергии на напряжении 0,66 кВ переменного тока и 1 кВ постоянного тока. Силовые кабели марок АсВВ и АсВтВ предназначены для передачи больших значений тока при номинальном напряжении 1 кВ и температуре окружающей среды от -50 до +50°С. Силовые кабели АВБВ и ВБВ предназначены для открытой прокладки на кабельных трассах с неограниченной разностью уровней в электрических сетях переменного напряжения 0,66 кВ и 1 кВ постоянного напряжения во взрывоопасных

помещениях, установках и помещениях с химически активными средами.

Силовые кабели с резиновой изоляцией предназначены для передачи и распределения электроэнергии на переменном и постоянном напряжении. Их прокладывают внутри помещений, в каналах, туннелях. Гибкие силовые кабели с резиновой изоляцией применяются для электропитания подвижных электроприемников различных механизмов: строительных машин, сварочных установок, машин и механизмов в горнорудной промышленности, например, электрических экскаваторах, шахтном электрооборудовании и др. Это такие марки как КШВГ, КШВГТ, ГРШЭ, КРПТ, КРПГ и т.д. Специализированные гибкие кабели (ВР-25-2, РПШ, КВОРН, КРЗ, КГПС) предназначены для питания высоковольтных радио- и рентгеновских установок, это также аэродромные кабели, кабели для установок электросварки, прожекторов и т.п.

Контрольные кабели используются для передачи низковольтных маломощных сигналов управления в различных электротехнических устройствах. Изоляция контрольных кабелей (К) изготавливается из резины (обозначение в марке - Р), поливинилхлоридного пластика (В), полиэтилена (П), фторопласта (Ф), в некоторых случаях - из кабельной пропитанной бумаги. Кабели могут иметь оболочки из резины или пластмассы, свинца, алюминия, Для защиты от внешних электрических полей также могут иметь экран (Э). В зависимости от условий прокладки кабели могут иметь броневые (Б) и защитные покровы. Пример: КРСБ - контрольный кабель с медными жилами, резиновой изоляцией, свинцовой оболочкой, бронированный. АКВВБГ - контрольный кабель с алюминиевыми жилами, поливинилхлоридной изоляцией и оболочкой, бронированный двумя стальными лентами с противокоррозионным покрытием. Обозначения в марке кабелей с ПВХ изоляцией жил - КВВГ, КВВГЭ, КВВБ, КВВБГ; с ПЭ изоляцией жил - КПВГ, КПВБ, КПВБГ, КПВББГ. Если в начале маркировки обозначена буква А - силовой кабель имеет алюминиевые жилы.

Силовые кабели с пропитанной бумажной изоляцией предназначены для передачи и распределения электроэнергии в стационарных электрических сетях на переменные напряжения 1, 3, 6 и 10 кВ, а также в сетях постоянного тока. Их изготавливают с алюминиевой или свинцовой оболочкой, выпрессованными на гидравлических или червячных прессах. В зависимости от марки поверх изоляции жилы накладывают металлическую, как правило, алюминиевую или свинцовую, влагозащитную оболочку с целью получения равномерно распределенного радиального электрического поля. К этому типу относится АСБ - кабель с алюминиевыми жилами (СБ - медные жилы), бронированный стальными лентами с наружным защитным покровом. Его область

применения - прокладка в земле и по стенам (вне зданий) при необходимости защиты кабеля от механических повреждений в сетях до 10 кВ. СГ, ЦАСБ, ЦСБ и другие.

Важное достоинство кабеля с бумажной пропитанной изоляцией, рассчитанного на низкое и среднее напряжение - стабильные электрические характеристики. Однако недостатками являются трудоемкий процесс изготовления, дорогостоящая и, к тому же, тяжелая металлическая оболочка данного типа силового кабеля.

По величине линейного рабочего напряжения силовые кабели подразделяют на: кабели на напряжения 1-10 кВ, 20-35 кВ, 110-500 кВ.

Приведенная классификация в известной мере условна, однако позволяет систематически представить сведения о части кабелей, насчитывающей более 1000 марок и конструкций.

Силовые кабели состоят из одной, трех или четырех одно- или многопроволочных медных или алюминиевых жил, изолированных друг от друга и окружающей среды бумажно-пропитанной, резиновой или пластмассовой изоляцией, герметизированных свинцовыми, алюминиевыми, пластмассовыми или резиновыми оболочками и защищенных, как правило, броней из стальных лент или оцинкованной стальной проволоки, а также защитными антикоррозионными покровами.

Изоляции жил кабелей изготавливаются из бумажных лент, пропитанных маслоканифольным составом, из поливинилхлоридного пластика, полиэтилена, сшитого полиэтилена, резины.

Диапазон переменного рабочего напряжения, на который изготавливаются силовые кабели, находится в пределах от 660 В до 500 кВ. Величина рабочего напряжения влияет на конструкцию кабелей.

Буквенное обозначение определяет конструкцию кабелей, их брони, защитных оболочек и покровов. Кабели с алюминиевыми жилами обозначают буквой А. Наличие медных жил в маркировке кабеля не выделяется [3].

1.2 Конструкция жил силовых кабелей

Жилы силовых кабелей выполняются однопроволочными и многопроволочными. В маркировке кабелей с однопроволочной жилой добавляется обозначение «ож». Жилы изготовляют круглой формы для одножильных и трехжильных кабелей в отдельных металлических оболочках всех сечений и многожильных с поясной изоляцией сечением до 16 мм² включительно. Жилы сечением 25 мм² и более для многожильных кабелей с поясной изоляцией изготавливают сегментной или секторной формы. Алюминиевые жилы силовых кабелей сечением 6-240 мм² и медные сечением 6-50 мм² изготавливают

сплошными однопроволочными. Соответственно алюминиевые сечением 70-800 мм² и медные сечением 25-800 мм² - многопроволочными. Многопроволочные медные и алюминиевые жилы сегментной и секторной формы уплотняют в процессе изготовления. Силовые кабели с изоляцией из бумажных лент, пропитанных маслоканифольным составом. Для вертикальных или крутых кабельных трасс используются кабели с или изоляцией с нестекающим пропитывающим составом. Кабели с пластмассовой изоляцией на напряжения 0,66-6 кВ изготавливаются в соответствии с ГОСТ 16442-80. В качестве изоляции для одножильных кабелей на напряжения 10, 35 и 500 кВ используется вулканизированный полиэтилен (кабели марок АПаВ, АПВП, АПвПс). Напряжение между жилой и заземленным экраном составляет соответственно 5,8; 20 и 64 кВ [3].

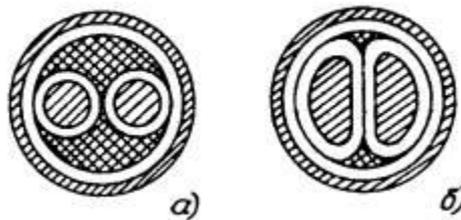


Рисунок 2. Двухжильные кабели скруглыми (а) и сегментными (б) жилами

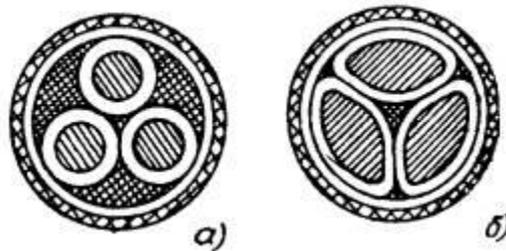


Рисунок 3. Трехжильные кабели скруглыми (а) и секторными (б) жилами



Рисунок 4. Четырехжильные кабели

1.3 Маркировка силовых кабелей

Маркировка силовых кабелей обычно включает буквы, указывающие на материал, из которого изготовлены жила, изоляция, оболочка и тип защитного покрова. Медные

токопроводящие жилы в маркировке кабелей не отмечаются специальной буквой, алюминиевая жила обозначается буквой А, стоящей в начале маркировки. Следующая буква марки кабеля указывает на материал изоляции, причем бумажная пропитанная изоляция не имеет буквенного обозначения, полиэтиленовая изоляция обозначается буквой П, поливинилхлоридная - буквой В, а резиновая изоляция - буквой Р.

Далее следует буква, соответствующая типу защитной оболочки: А - алюминиевая, С - свинцовая, П - полиэтиленовый шланг, В-оболочка из поливинилхлорида, Р - резиновая оболочка.

Последние буквы указывают на тип защитного покрова. Например, кабель СГ имеет медную жилу, бумажную пропитанную изоляцию, свинцовую оболочку, защитные покрытия отсутствуют. Кабель марки АПАШВ имеет алюминиевую жилу, изоляцию из полиэтилена, алюминиевую оболочку и шланги из поливинилхлоридного пластика [2].

1.4 Маслонаполненные кабели

В маслонаполненных кабелях бумажная изоляция пропитывается маслом, которое постоянно держится под давлением. В процессе изготовления из каждого кабеля откачивается воздух, и полость заполняется маслом. Особенно важно обеспечить отсутствие воздушных пузырьков. Во время эксплуатации кабель нагревается и масло расширяется. Изменения объема масла регулируются компенсационными резервуарами, соединенными с концами кабеля. Давление в резервуарах поддерживается сжатым воздухом, находящемся в сжимаемых секциях. Масляные протоки внутри кабеля позволяют ему свободно перетекать при расширении или сжатии. Объем гидравлической системы выбирается в соответствии с длиной кабеля так, чтобы даже в случае короткого замыкания риск механического повреждения был минимален за счет выравнивания гидравлического давления, вызванного выбросами давления вследствие резкого нагрева.

Маслонаполненные кабели чрезвычайно устойчивы к старению. Измерения коэффициента диэлектрических потерь кабеля, предназначенного для напряжения 150 кВ и находящегося в эксплуатации 30 лет, дали практически такой же результат, как и тогда, когда впервые ввели в эксплуатацию. Маслонаполненные кабели, отличающиеся тем преимуществом, что в них возможен постоянный мониторинг давления масла, сегодня остаются наиболее надежными в эксплуатационном отношении среди всех высоковольтных и сверх высоковольтных кабелей.

Маслонаполненные кабели имеют толстую бесшовную герметичную оболочку из свинца, или медную или алюминиевую гофрированную оболочку, которая заключает в себе гидравлический контур [1].

Рекомендуемые способы применения маслонаполненных кабелей

Марки кабелей	Применение
МНАШв, МНС, МНСНв МНАШву, МНСНв, МНАгШву, МНСА МНСК МВДТ, МВДТк	В каналах зданий и туннелях В земле, в траншеях, если кабель не подвергается растягивающим усилиям и защищен от механических повреждений Под водой, в болотистой местности, где кабель подвергается растягивающим усилиям и где требуется его дополнительная механическая защита В стальном трубопроводе с маслом под давлением, прокладываемом в туннелях, в земле под водой

1.5 Газонаполненные кабели

Газонаполненными кабелями называют силовые кабели с бумажной обедненной пропитанной изоляцией, пустоты в котором заполнены газом под давлением. В зависимости от величины избыточного давления газонаполненные кабели делят на кабели низкого давления (0,7-1,5 кгс/см²); кабели среднего давления (1,7-3,0 кгс/см²); кабели высокого давления (10-14 кгс/см²).

Газонаполненный кабель бывают одно- и трехжильные в или оболочке и трехжильные в стальном трубопроводе. Жилы газонаполненных кабелей с целью снижения в них объема пропиточного состава выполняют секторными сплошными или многопроволочными уплотненными. На жилу накладывают полупроводящую бумагу, пропитанную бумажную изоляцию, обедненную от избытка пропиточного состава, перфорированную металлизированную бумагу и медную ленту. Толщину изоляции кабелей на напряжение 10 кВ применяют не менее 3 мм, а кабелей на напряжение 35 кВ - 7 мм. Изоляцию кабелей 35 кВ выполняют двухслойной бумагой толщиной 0,08 мм по жиле (толщиной не менее 1,5 мм) и бумагой толщиной 0,120 мм.

Преимущества газонаполненного кабеля - простота подпитки кабельной линии газом, удобство изготовления кабеля большой длины с предварительно пропитанной изоляцией, что особенно важно для подводной прокладки. Однако газонаполненный кабель имеют сравнительно низкую электрическую прочность изоляции, которая в значительной мере зависит от изменения температуры и давления газа. Электрическая прочность газов и соответственно газонаполненных кабелей зависят от температуры.

Естественно, что допустимые градиенты должны определяться исходя из максимальной температуры кабеля в рабочем режиме. С другой стороны, благоприятным фактором является отсутствие ограничений в отношении работы газонаполненных кабелей при низких температурах [1].

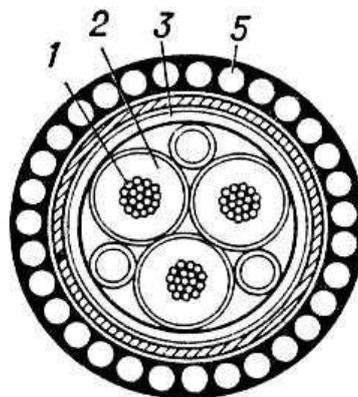


Рисунок 5. Газонаполненный под давлением бронированный кабель ГЭСК. 3-жильный с бумажной изоляцией, экранирован бумажной металлизированной лентой и медной лентой; газ подаётся между жилами; сечение 70-150 мм²; напряжение 60-138 кв; предельная температура 70°С. Для линий электропередачи высокого напряжения; разность уровней прокладки не ограничена. 1 - токопроводящая жила; 2 - изоляция; 3 - оболочка; 5 - броня, экран

Градиентирование изоляции. При переходе границы раздела диэлектриков с разными диэлектрическими проницаемостями тангенциальная составляющая электрического поля E_{τ} остается постоянной, а нормальная компонента E_n изменяется в соответствии с изменением ϵ :

$$\epsilon_1 E_{n1} = \epsilon_2 E_{n2}; \quad E_{\tau 1} = E_{\tau 2} \quad (1)$$

Данная закономерность открывает возможность целенаправленного изменения электрического поля в изоляционном промежутке применением материалов с разными ϵ . Наибольший эффект регулирования имеет место в тех случаях, когда граница раздела совпадает с эквипотенциальной поверхностью (E_{τ} остаются постоянными, а E_n изменяется максимально возможно), например, в случае цилиндров - одножильных кабелей высокого напряжения.

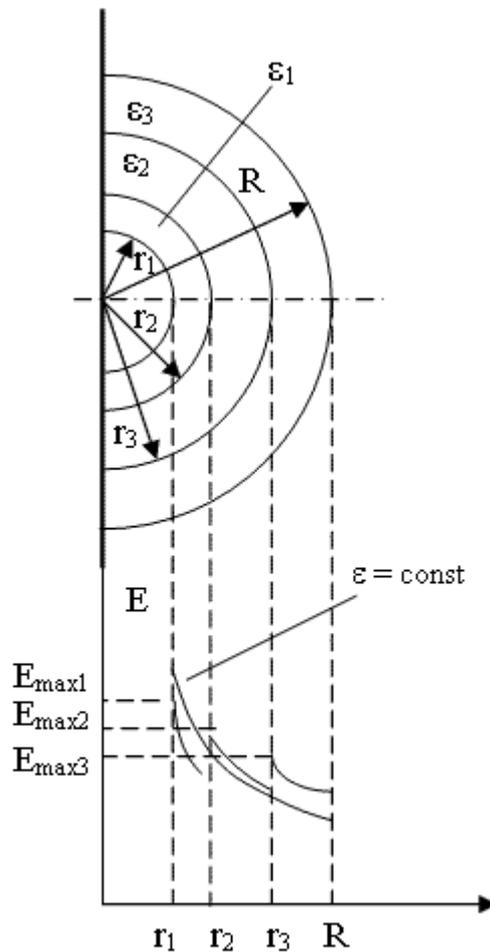


Рисунок 6 Распределение напряжения по изоляции

Для случая, показанного на рисунке 6, в силу теоремы Гаусса, потребовав равенства между собой всех $E_{i\max}$ (напряженности в начале слоев), получим соотношение

$$2\pi r_1 \varepsilon_1 E_{1\max} = 2\pi r_2 \varepsilon_2 E_{2\max} = 2\pi r_3 \varepsilon_3 E_{3\max} \quad (2)$$

Из (2) следует, что равенство $E_{i\max}$ обеспечивается при соблюдении условий $r_k \varepsilon_k = const$. Электрическое поле при этом становится более однородным, следовательно, общее правило градирования может быть сформулировано следующим образом: в области повышенных напряженностей электрического поля, (меньших радиусов кривизны эквипотенциальных поверхностей), следует размещать электроизоляционные материалы с большими диэлектрическими проницаемостями.

Запас электрической прочности изоляции может быть оценен с помощью коэффициента использования изоляции

$$\eta = \frac{E_{cp}}{E_{max}} = \left\{ \begin{array}{l} \text{для цилиндрического конденсатора} \\ E_{cp} = \frac{U}{R-r_1}; E_{max} = \frac{U}{r_1 \ln \frac{R}{r_1}} \end{array} \right\} = \frac{r_1 \ln \frac{R}{r_1}}{R-r_1} = \left\{ N = \frac{R}{r_1} \right\} = \frac{\ln N}{N-1} \quad (3)$$

В большинстве случаев толщина изоляции кабеля определяется максимально допустимой рабочей напряженностью E_p . При этом значение N может быть определено

$$N = \frac{R}{r_1} = e^{U/r_1 E_p}$$

по формуле

которая следует из уравнений

$$E_p = \frac{U}{r_1 \ln \frac{R}{r_1}} = \frac{U}{r_1} \ln \frac{r_1}{R}; \quad \ln \frac{r_1}{R} = \frac{E_p r_1}{U} \Rightarrow e^{\frac{E_p r_1}{U}} = \frac{r_1}{R}; \quad \frac{R}{r_1} = e^{\frac{U}{E_p r_1}}$$

При условии $\varepsilon r = const$ напряженность электрического поля $E = \frac{-U}{r \varepsilon \int_n^R \frac{dr}{r \varepsilon}}$ будет

постоянной и равной $E_p = \frac{U}{R-r_1}$, толщина слоя изоляции будет минимальной, а коэффициент использования равен 1.

Практически, уменьшение ε , с увеличением радиуса производится степенями.

При двухслойном градировании

$$E = U / \left[\varepsilon \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} \right) \right] \quad (4)$$

а напряженности поля в начале первого и второго слоев будут, соответственно, равны:

$$E_1 = U / \left[\varepsilon_1 r_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} \right) \right] \quad (5)$$

$$E_2 = U / \left[\varepsilon_2 r_2 \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} \right) \right] \quad (6)$$

Разделив (5) на (6), получим соотношение для определения внутреннего радиуса изоляции: $r_2 = r_1 \varepsilon_1 / \varepsilon_2 \cdot E_1 / E_2 = r_1 k f$, где ε_1 и ε_2 - относительные диэлектрические проницаемости первого и второго слоев;

E_1 и E_2 - рабочие напряженности для изоляции первого и второго слоев;

$$k = \varepsilon_1 / \varepsilon_2; \quad f = E_1 / E_2.$$

Подставим r_2 в выражение для E_1 :

$$E_1 = U / \left\{ \varepsilon_1 r_1 \left[\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \left(\frac{1}{r_1} \cdot r_1 \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot \frac{E_1}{E_2} \right) + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \left(\frac{r_3}{r_1 \frac{\varepsilon_1}{r_2} \frac{E_1}{E_2}} \right) \right] \right\} =$$

$$= U / \left[\varepsilon_1 r_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \ln k f + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_1} \cdot \frac{1}{k f} \right) \right].$$

Соотношение для внешнего радиуса изоляции определим в результате следующих преобразований:

$$E_1 \left[r_1 \ln k f + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} r_1 \ln \frac{r_3}{r_1} \cdot \frac{1}{k f} \right] = U, \text{ откуда}$$

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} r_1 \ln \frac{r_3}{r_1} \cdot \frac{1}{k f} = \frac{U - E_1 r_1 \ln k f}{E_1} \text{ и}$$

$$\frac{r_3}{r_1} = k f e^{\frac{1}{k r_1} \frac{U - E_1 r_1 \ln k f}{E_1}} = k f e^{\frac{1}{k} \left(\frac{U}{E_1 r_1} - \ln k f \right)}.$$

Для трехслойной изоляции

$$E_1 = U / \left[\varepsilon_1 r_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\varepsilon_3} \ln \frac{R}{r_3} \right) \right],$$

$$E_2 = U / \left[\varepsilon_2 r_2 \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\varepsilon_3} \ln \frac{R}{r_3} \right) \right],$$

$$E_3 = U / \left[\varepsilon_3 r_3 \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\varepsilon_3} \ln \frac{R}{r_3} \right) \right].$$

Для изоляции из n слоев:

$$E = U / \left[\varepsilon_n r_n \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \dots + \frac{1}{\varepsilon_n} \ln \frac{R}{r_n} \right) \right].$$

$$E = -U_0 / r \varepsilon \int_{r_1}^R \frac{dr}{\varepsilon r}$$

Выведем, для справки, полезное при решении задач соотношение

В качестве поверхности S интегрирования выберем цилиндр единичной длины -

$$\oint_S \vec{E} \cdot \vec{ds} = \frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0}$$

эквипотенциаль $E = const$. Уравнение Гаусса решаем с учетом связи

$$E = -\frac{dU}{dr}$$

между напряженностью электрического поля и потенциалом (осесимметричная система - зависимость только от r).

Тогда

$$\oint_S \vec{E} \cdot \vec{dS} = E \int_0^1 dy \int_0^{2\pi} dx = 2\pi r E = \frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0} \quad \text{и} \quad E = \frac{q}{2\pi r \varepsilon \varepsilon_0} = -\frac{dU}{dr}$$

Выразим E через потенциал жилы U_0 , а не через заряд q :

$$U_0 = -\int_{r_1}^R \frac{q dr}{2\pi r \varepsilon \varepsilon_0} = -\frac{q}{2\pi} \int_{r_1}^R \frac{dr}{\varepsilon_0 \varepsilon r} \Rightarrow q = -\frac{2\pi U_0}{\int_{r_1}^R \frac{dr}{\varepsilon \varepsilon_0 r}}$$

Поэтому

$$E = - \frac{2\pi U_0}{2\pi r \varepsilon \varepsilon_0 \int_1^R \frac{dr}{\varepsilon \varepsilon_0 r}} = -U_0 / r \varepsilon \int_1^R \frac{dr}{\varepsilon r}$$

Конденсаторные обкладки. Практика проектирования вводов показала, что без применения специальных мер регулирования электрического поля в осевом и радиальном направлениях удастся создать рациональные конструкции на номинальные напряжения 6—10 кВ, иногда до 35 кВ. Выполнить вводы на напряжения 110 кВ и более без эффективного регулирования электрического поля невозможно. Практически во всех реальных конструкциях вводов с бумажно-масляной и твердой внутренней изоляцией на напряжения 110 кВ и выше для регулирования электрического поля используют системы конденсаторных (уравнительных) обкладок. Эскиз такой системы показан на рис. 7. Обкладки выполняют, как правило, из алюминиевой фольги толщиной 0,012—0,020 мм и закладывают в изоляционное тело при намотке слоев бумаги. Эффект регулирования электрического поля достигается при этом за счет того, что обкладки из проводящего материала принудительно создают такую систему эквипотенциальных поверхностей, которой соответствует более однородное поле во внешней и внутренней изоляции ввода.

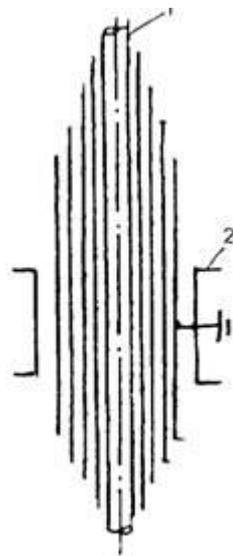


Рисунок 7. Система конденсаторных обкладок для регулирования электрического поля во вводе: 1 — токоведущий стержень (труба); 2 — втулка.

В частности, используются так называемые равноемкостные системы конденсаторных обкладок, в которых размеры обкладок выбираются такими, что емкости между всеми парами соседних обкладок получаются одинаковыми. Вследствие этого напряжение, приложенное к вводу, равномерно распределяется по слоям между обкладками. Если при этом длины уступов одинаковы для всех пар обкладок, то средние напряженности в аксиальном направлении получаются постоянными. Одновременно более равномерным получается поле и в радиальном направлении.

У краев конденсаторных обкладок электрическое поле получается резко неоднородным. Однако, области повышенных напряженностей имеют относительно небольшие размеры. Например, область у края обкладки, в пределах которой напряженность поля превышает среднюю в 3 раза и более, имеет размеры около 2 % от толщины слоя изоляции между обкладками. Поэтому число обкладок принимается достаточно большим, чтобы толщины слоев изоляции между обкладками были относительно малыми. В результате области с резко неоднородными полями у краев конденсаторных обкладок оказываются настолько малыми, что развитие в них разрядных процессов затрудняется. Следует обратить внимание на то, что длина последней, заземляемой конденсаторной обкладки (считая от токоведущего стержня) несколько больше, чем длина втулки. Благодаря этому экранируются острые края втулки и напряженность электрического поля около этих краев существенно снижается. Тем самым исключается возможность появления здесь короны и значительно повышается разрядное напряжение в воздухе вдоль поверхности изоляционного тела.

Регулирование электрического поля может осуществляться с помощью так называемых конденсаторных обкладок, представляющих собой дополнительные электроды из металлической фольги, которые располагаются в толще изоляции между главными электродами. В результате образуется цепочка последовательно включенных конденсаторов, емкости которых при переменном напряжении (или сопротивлении изоляции между обкладками при постоянном напряжении) определяют распределение напряженностей в изоляции.

Путем изменения размеров, количества и взаимного расположения конденсаторных обкладок можно менять емкости последовательно включенных конденсаторов, регулируя тем самым характер распределения напряженностей.

Конденсаторные обкладки могут располагаться в области основной изоляции между электродами для регулирования поля как в радиальном, так и в осевом направлении, а

также в области между краями электродов для выравнивания электрического поля между ними.

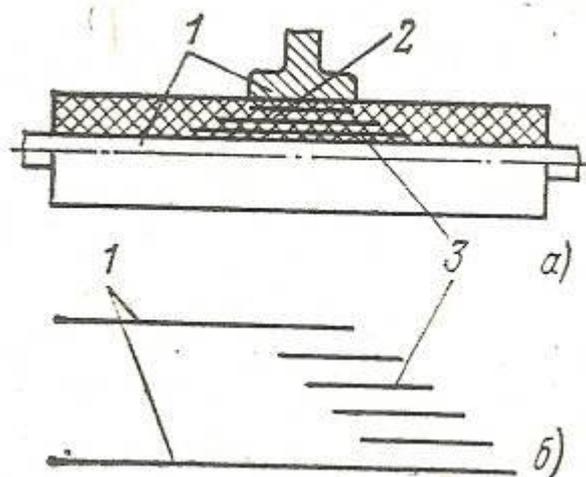


Рисунок 8 . Варианты расположения конденсаторных обкладок в изоляции. а. – между электродами для регулирования в области основной изоляции; б. между электродами для регулирования поля между краями электродов. 1 – электрод; 2 – диэлектрик; 3 – конденсаторная обкладка.

Выбор размеров и расположение обкладок в изоляции с осевой симметрией производится на основании предположения, о постоянстве потока смещения через все обкладки, расположенные между главными электродами (искажением поля на краях конденсаторных обкладок пренебрегаем):

$$2\pi r l \epsilon \epsilon_0 E_r = \text{const},$$

E_r – напряженность поля у конденсаторной обкладке;

r и l – радиус и длина обкладки.

Если принять, что максимальные напряженности поля в пределах каждого слоя между двумя соседними обкладками должны быть одинаковыми, то размеры обкладок могут выбираться из условия $r_l = \text{const}$,

при достаточно большом количестве обкладок $\Delta r = r_{n+1} - r_n$ мало (2 – 4 мм), поэтому в пределах каждого слоя разница между максимальной и минимальной напряженностями поля ничтожна и, таким образом, напряженность поля в радиальном направлении

практически постоянна (рис. 2). Следовательно, начальное распределение перенапряжения будет равномерным.

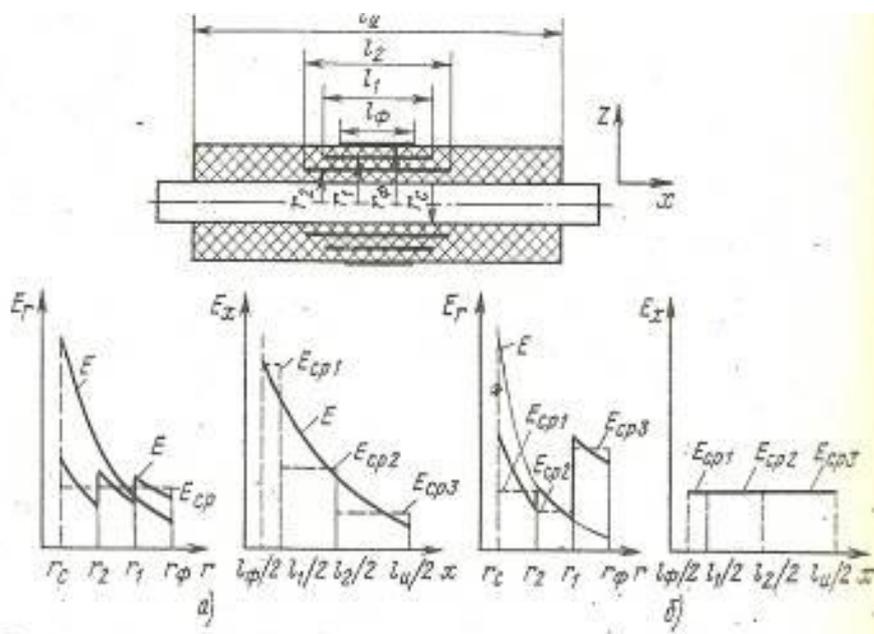


Рис.9. Регулирование электрического поля с помощью конденсаторных обкладок. а. – в радиальном направлении; б. – в осевом направлении.

Это позволяет существенно уменьшить диаметр изоляционной конструкции.

Примеры расчета задач

Задача 1

Высоковольтный кабель низкого давления имеет:

номинальное напряжение: $U=110$ кВ;

передаваемая мощность: $P=60$ МВт, $\cos\phi=0,85$;

диаметр маслопроводящего канала: $d_k=13$ мм;

толщина бумаги 1-го и 2-го слоя изоляции: $\delta_1=0,025$ мм, $\delta_2=0,17$ мм.

Решение:

Электрический ток кабеля:

$$I_{\text{ном}} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\phi} = \frac{60}{(\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 0.85)} = 0.370 \text{ кА}$$

Расчетное сечение жилы кабеля:

$$F_{\text{жж}} = 0.012 \cdot (I_{\text{ном}} \cdot 1000)^{1.6} = 0.012 \cdot \left[\frac{60}{(\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 0.85)} \cdot 1000 \right]^{1.6} = 154.6 \text{ мм}^2$$

Коэффициент заполнения (жила изготовлена из 6 уплотненных изолированных полупроводящей бумагой сегментов): $k_{\text{зап}} = 0.84$

Суммарное сечение с учетом сечения маслопроводящего канала и токоведущей жилы:

$$F_{\text{жк}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{к}}^2}{4} + \frac{F}{k_{\text{зап}}} = \frac{\pi \cdot 13^2}{4} + \frac{150}{0.84} = 311.3 \text{ мм}^2$$

Общий радиус:

$$r_0 = \sqrt{\frac{F_{\text{жк}}}{\pi}} + \Delta_{\text{экр}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{\pi \cdot 13^2}{4} + \frac{150}{0.84} \right)}{\pi}} + 0.8 = 10.754 \text{ мм где}$$

$\Delta_{\text{экр}} = 0.8 \text{ мм}$ - толщина экрана из полупроводящей бумаги

$k_1 = 1.15$ - учитывает увеличение напряжения в кабеле;

$k_2 = 1.3$ - учитывает отклонение фактической электрической прочности изоляции от среднего значения;

$k_3 = 2.25$ - учитывает уровень внутренних коммутационных перенапряжений;

$k_4 = 1.2$ - учитывает уменьшение пробивной напряженности;

Изоляцию выбираем градированной (это повышает коэффициент использования изоляции и уменьшает ее толщину)

жила бумаги марки КВМУ толщина 0,025 мм

второй слой из бумаги КВМ толщиной 0,17 мм

Коэффициент пересчета электрической прочности ($p_1 = 1.5 \text{ МПа}$, $p_2 = 0.5 \text{ МПа}$):

$$k = \frac{E_{\text{доп}p_1}}{E_{\text{доп}p_2}} = \frac{1 + 0.3 \cdot p_1}{1 + 0.3 \cdot p_2} = \frac{1 + 0.3 \cdot 1.5}{1 + 0.3 \cdot 0.5} = 1.261$$

Электрическая прочность при напряжении промышленной частоты:

Коэффициент отношения диэлектрических проницаемостей первого и второго слоев изоляции:

Задача 2 (для тех же условий расчет кабельной концевой муфты)

Выбираем расчетные напряжения и напряженности для внутренней изоляции[4]:

$U_p = 280 \text{ кВ}$ ([4], табл. 4.6); $E_p = 20 \text{ кВ/мм}$, $E_t = 1 \text{ кВ/мм}$ ([4], табл. 4.7)

Число конденсаторных обкладок для выравнивания электрического поля:

$$n = \frac{U_p}{1.75 \cdot 0.9 \cdot E_T} = \frac{280}{(1.75 \cdot 0.9 \cdot 20)} = 8.889$$

Выбираем изоляторы класса А, работающие в слабо загрязненной атмосфере. Для данных изоляторов минимальное значение длины пути утечки при классе напряжения 110 кВ [4]: $L_{ут} = 190$ см

Выбираем фарфоровые покрышки с ребрами типа 1, относящиеся к категории А - нормальное исполнение.

Рабочая длина k-ой обкладки: $l'(k) = l(k) - \lambda_1$.

Длины конденсаторных обкладок

К	$l(k)$, мм	$l'(k)$, мм
0	351.163	298.566
1	329.677	277.08
2	308.191	255.594
3	286.705	234.109
4	265.22	212.623
5	243.734	191.137
6	222.248	169.651
7	200.762	148.165
8	179.276	126.68
9	157.791	105.194

Определим диаметры конденсаторных слоев. Принимаем толщину первой обмотки 3 мм.

Диаметр жилы кабеля: $d_{ж} = 2 \cdot r_0 = 2 \cdot 10.75$

Задаемся значениями $k=1-8$ и находим d_2-d_9 (мм). Результаты сведены в таблицу 2.

Диаметры конденсаторных слоев

К	$d(k)$, мм
1	21.508
2	27.508

3	33.11
4	38.343
5	43.121
6	47.369
7	51.044
8	54.531
9	57.744
10	60.911

Толщина последних слоев не меньше допустимой (1,5 мм).

Диаметр последнего конденсаторного слоя: $D_{10,1}=60.911$ мм

$R_{II} = D_{10,1}/2 = 30.456$ мм

$$L_{ab} = \frac{U_p}{E_r} \cdot \ln \left(\frac{\varepsilon_{r2} \cdot \ln \left(\frac{r_1}{r_0} \right) + \varepsilon_{r1} \cdot \ln \left(\frac{R_{II}}{r_1} \right)}{\varepsilon_{r2} \cdot \ln \left(\frac{r_1}{r_0} \right) + \varepsilon_{r1} \cdot \ln \left(\frac{R}{r_1} \right)} \right) = \frac{280}{1} \ln \left(\frac{3.3 \ln \left(\frac{10.779}{10.754} \right) + 4.3 \ln \left(\frac{30.456}{10.779} \right)}{3.3 \ln \left(\frac{10.779}{10.754} \right) + 4.3 \ln \left(\frac{18.169}{10.779} \right)} \right) = 192.115 \text{ мм}$$

Длина выравнивающего конуса (рис. 12):

Длина кабельной разделки: $L_{Ж} = 100$ мм - длина голой жилы, необходимой для опрессования наконечника

$L_{КР} = L_{ab} + l(16) + n \cdot \lambda_1 + L_{Ж} = 772.877$ мм

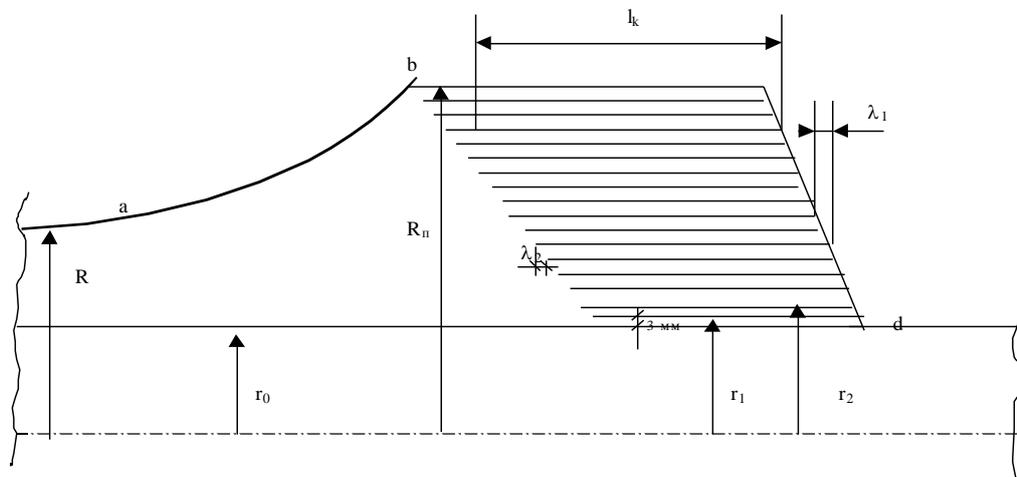


Рис. 10. Расчет подмотки концевой муфты конденсаторного типа

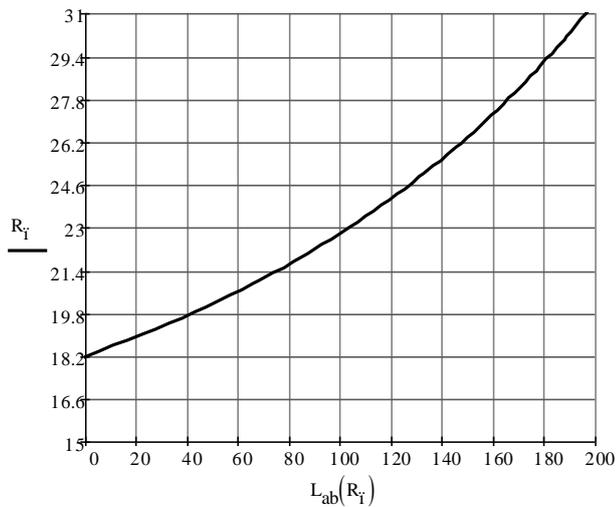


Рис. 11. Форма выравнивающего конуса концевой подмотки

Задача 3 (для тех же условий расчет соединительной муфты кабеля)

Определим радиус подмотки. Т.к. в кабеле применяется градированная изоляция, а изоляционная муфта выполнена из бумаги той же плотности, что и наружный слой изоляции кабеля, то радиус подмотки определяется:

$$\ln\left(\frac{R_{II}}{r_1}\right) = \frac{U_P \cdot \varepsilon_{r2}}{r_0 \cdot \varepsilon_{r1} \cdot E_\tau} - \frac{\varepsilon_{r2}}{\varepsilon_{r1}} \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) = \frac{280 \cdot 3.3}{10.779 \cdot 4.3 \cdot 1} - \frac{3.3}{4.3} \ln\left(\frac{10.779}{10.754}\right) = 1.039$$

Размер обратного конуса:

$$L_{ef} = \frac{\varepsilon_{r2} \cdot U_P \cdot \ln\left(\frac{R}{r_0}\right)}{E_\tau \cdot \left(\varepsilon_{r2} \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) + \varepsilon_{r1} \cdot \ln\left(\frac{R_{II}}{r_1}\right) \right)}$$

Задача 4. Выбор и расчет изоляции кабеля.

Выбираем кабель на 10 кВ АСБ 3x150 мм²

$I_{дл.доп} = 240\text{А}$ – при прокладке кабеля в земле, при $t = 15\text{ }^\circ\text{C}$

$$\Delta = 1,5 \text{ мм}$$

$$\Delta_1 = 3 \text{ мм}$$

$$m = 19$$

$r_1 = 11,7 \text{ мм}$ – радиус скрутки жил,

$r_2 = 1,25 \text{ мм}$ – радиус одной проволоки.

Максимальная напряжённость электрического поля для гладкой жилы

• в точке В:

$$E_{\text{max.В}} = \frac{U_{\phi}}{r_2 \ln \frac{r_2 + 1,16\Delta}{r_2}} = \frac{11,5/\sqrt{3}}{2 \cdot \ln \frac{2 + 1,16 \cdot 1,5}{2}} = 5,3 \text{ кВ/мм}$$

• в точке А:

$$E_{\text{max.раб}} = \frac{U_{\text{раб.макс}} \cdot \sqrt{\frac{v \cdot 4}{v}}}{2 \cdot r \cdot \ln \frac{\sqrt{v+4} \cdot \sqrt{v}}{\sqrt{v+4} - \sqrt{v}}} = \frac{11,5 \frac{3+4}{3}}{2 \cdot 2 \cdot \ln \frac{\sqrt{3+4} + \sqrt{3}}{\sqrt{3+4} - \sqrt{3}}} = 2,8 \text{ кВ/мм},$$

$$U = \frac{2\Delta_1}{r_1} = \frac{2 \cdot 3}{2} = 3$$

где

Для негладких жил

$$\lambda = \frac{1 + m \cdot \sin \frac{\pi}{m}}{\sin \frac{\pi}{m}} = \frac{1 + 19 \cdot \sin \frac{180}{19}}{\sin \frac{180}{19}} = 25,07$$

Коэффициент неоднородности в точке А.

$$\beta_A = \frac{\lambda}{m + \ln \frac{\lambda/m}{\ln \frac{r_2}{r_1}}} = \frac{25,07}{19 + \ln \frac{25,07/19}{\ln \frac{1,25}{11,7}}} = \frac{25,07}{19,527} = 1,35.$$

Тогда максимальное значение напряженности в точке А:

$$E_{\text{max.А}} = E_{\text{max.раб}} \cdot \beta_A = 2,8 \cdot 1,357 = 3,8 \text{ кВ/мм}.$$

Коэффициент неоднородности в точке В

$$\beta_B = \frac{\lambda}{m + \ln \frac{\lambda/m}{\ln \frac{R_2}{R_1}}} = \frac{25,07}{19 + \ln \frac{25,07/19}{\ln \frac{1,25}{2}}} = 1,25$$

Максимальное значение напряженности негладких жил в точке В.

$$E_{\max.B} = E_{\max.A} \cdot \beta_B = 5,3 \cdot 1,25 = 6,625 \text{ кВ/мм}$$

Расчет показал, что напряжённость электрического поля фазного провода больше в точке А.

Тепловой расчёт кабеля

В расчете не учитываем тепловое сопротивление жилы кабеля, а также диэлектрические потери, которые при данном напряжении составляют порядка 10-5 Вт/см.

Увеличение сопротивления при приложении переменного напряжения:

$$R_{\approx} = R_{\text{пост.т}} (1 + y_{\text{п}} + y_{\text{б}}). \quad [5.(3-80)].$$

Сопротивление при постоянном токе:

$$R_{\text{пост.т}} = \frac{\rho(1 + \alpha(t_{\text{доп}} - 20^0))}{S} \quad [5.(3-79)].$$

$\rho = 2,8264 \cdot 10^{-8}$ Ом/м – объемное удельное сопротивление алюминия.

$\alpha = 4,03 \cdot 10^{-3}$ 1/с – температурный коэффициент сопротивления.

$t_{\text{доп}} = 60$ 0С – длительно допустимая температура.

$S = 120 \cdot 10^{-6}$ м² – площадь сечения жилы.

$$R_{\text{пост.т}} = \frac{2,8264 \cdot 10^{-8} [1 + 4,03 \cdot 10^{-3} (60 - 20)]}{120 \cdot 10^{-6}} = 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ Ом/м.}$$

Коэффициент, учитывающий влияние соседних жил кабеля:

$$y_{\delta} = \frac{1,18 y_{\pi}}{y_{\pi} + 0,27} \left(\frac{d}{a} \right)^2 = \frac{1,18 \cdot 0,0011}{0,0011 + 0,27} \left(\frac{12,36}{11} \right)^2 = 0,0053$$

d – эквивалентный диаметр жилы

$$d = d_{\text{э}} = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 120}{3,14}} = 12,36 \text{ мм.}$$

$$y_{\pi} = \frac{0,068^4}{192 + 0,8 \cdot 0,068^4} = 0,0011$$

$$R_{\text{ж}} \sim = 2,7 \cdot 10^{-4} (1 + 0,0011 + 0,0053) = 0,027 \cdot 10^{-2} \text{ Ом/м.}$$

Определим тепловое сопротивление изоляции:

$$\rho_{\text{из}} = k_1 \frac{\theta_{\text{из}}}{2\pi} \ln \frac{r_{\text{вн.о}}}{r_{\text{скр}}} = 1,1 \frac{600}{2 \cdot 3,14} \ln \frac{16,1}{11,7} = 33,5 \text{ С см/Вт}$$

$k_1 = 1,1$ – учитывает увеличение теплового сопротивления, связанное с изоляцией между соседними жилами.

$\theta_{\text{из}} = 600 \frac{\text{С см}}{\text{Вт}}$ – удельное сопротивление БМК.

$r_{\text{вн.о}} = 16,1 \text{ мм}$ – внешний радиус поясной изоляции.

$r_{\text{сект}} = 11,7 \text{ мм}$ – радиус сектора.

Тепловое сопротивление защитных покровов:

$$\rho_{\text{з.п}} = \frac{\theta_{\text{з.п}}}{2\pi} \ln \frac{r_{\text{нар.к}}}{r_{\text{нар.о}}} = \frac{330}{2 \cdot 3,14} \cdot \ln \frac{25,7}{17,9} = 19 \frac{\text{С} \cdot \text{см}}{\text{Вт}}$$

$\theta_{\text{з.п}} = 330 \frac{\text{С} \cdot \text{см}}{\text{Вт}}$ – тепловое сопротивление защитных покровов.

$r_{\text{нар.к}} = 25,7$ мм – наружный радиус кабеля.

$r_{\text{нар.о}} = 17,9$ мм – наружный радиус оболочки.

Тепловое сопротивление окружающей среды:

$$\rho_o = \frac{A}{\pi \cdot D_{\text{нор}}} = \frac{80}{3,14 \cdot 51,4} = 4,956 \frac{\text{С} \cdot \text{см}}{\text{Вт}}$$

где $A = 80 \frac{\text{С} \cdot \text{см}}{\text{Вт}}$ – удельное сопротивление теплоотдачи от поверхности кабеля;
 $D_{\text{нор}} = 51,4$

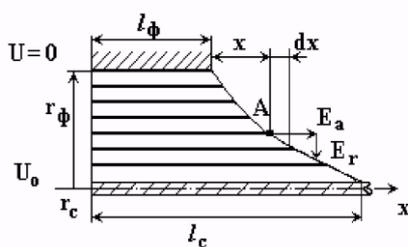
Находим допустимый ток через жилы [18, с. (3-76)].

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{t_{\text{ж.доп}} - t_o}{3R_{\text{ж}}(\rho_{\text{из}} + \rho_{\text{з.п}} + \rho_o)}} = \sqrt{\frac{60 - 15}{3 \cdot 0,027 \cdot 10^{-2} \cdot (33,5 + 19 + 4,956)}} = 309 \text{ А}$$

При этом допустимый ток по техническим требованиям составляет 240 А, т.е. изоляция соответствует нормативным требованиям по условиям термической стойкости.

Примеры для самостоятельного решения

Пример 1 Рассчитать количество конденсаторных обкладок для кабеля напряжением 110 кВ, диаметр токоведущей жилы 50мм, толщина изоляция мм 55 мм. Длина $l_c=350$ мм , $l_\phi=150$ мм.



Пример 2 Для изоляции использованы два типа бумаги с диэлектрическими проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 . Допустимая максимальная напряженность электрического поля в $E_{\text{доп}}$. Построить кривую распределения напряженности по толщине изоляции.

$U_{\text{НОМ}}$, кВ	S , мм ²	ϵ_1	ϵ_2	$E_{\text{доп}}$, кВ/мм
220	240	5,5	4,5	12

Практическая работа № 4

Расчет изоляции проходного изолятора

Краткие теоретические сведения

Проходные изоляторы применяются для ввода высокого напряжения внутрь металлических баков (трансформаторы, реакторы, конденсаторы, выключатели), а также для изоляции шин при проходе через стены распределительных устройств.

Один из недостатков проходных изоляторов – крайне неравномерное распределение радиальной и аксиальной напряженности электрического поля. Наибольшая напряжённость возникает у края фланца, где она направлена в основном вдоль поверхности изоляции ввода:

$$E_{\max} = E_{\text{ср}} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}} \cdot \sqrt{d}, \text{ где} \quad (1)$$

$E_{\text{ср}} = \frac{U}{d}$ - средняя радиальная напряжённость; d - толщина диэлектрика; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ - диэлектрическая проницаемость твёрдого диэлектрика и среды.

Из формулы (1) следует, что при неизменной $E_{\text{ср}}$ напряжённость E_{\max} растёт пропорционально \sqrt{d} . Как только E_{\max} у края фланца превысит допустимую, возникают местные разряды в виде короны или скользящих разрядов, приводящие к разрушению изоляции и возможным радиальным пробоям и продольным перекрытиям. Поэтому при конструировании вводов ВН необходимо применять искусственные меры для обеспечения большей равномерности радиальной напряженности.

Применение изоляторов конденсаторного типа позволяет получить требуемое распределение напряжения при помощи металлических обкладок, закладываемых в изоляции в процессе намотки. Использование конденсаторных обкладок позволяет достигнуть значительного сокращения размеров изоляторов, особенно их диаметров, что важно, так как в этом случае можно применять фарфоровые покрышки сравнительно малого диаметра [1].

Проходные изоляторы конденсаторного типа (в частности, с бумажно-масляной изоляцией) применяются на 110 кВ и выше. Изменяя размеры, число, взаимное расположение металлических обкладок можно менять ёмкость и тем самым характер распределения напряжения, как по толщине, так и по поверхности изоляции.

Изоляторы такого типа изготавливаются путём намотки на трубу ввода слоёв подсушенной кабельной бумаги, между которыми располагаются обкладки из

алюминиевой фольги толщиной 0,014мм. Бумага наматывается лентами вполнахлёста или с рулона шириной, равной высоте изоляции ввода. После намотки бумага срезается уступами в нижней и верхней части изоляционного остова. Затем следует тщательная вакуумная сушка и пропитка дегазированным трансформаторным маслом.

Для облегчения процесса сушки и пропитки изоляции целесообразно применять перфорированную фольгу.

Верхняя и нижняя части остова помещаются в фарфоровые покрышки, обычно применяется бесфланцевое крепление покрышек путём затяжки всей конструкции на стержне ввода с помощью пружин, расположенных в верхней части ввода, и нажимных гаек. Тепловое расширение длины трубы компенсируется пружинами за счёт их упругости. Стягивающие пружины должны создавать такое усилие, чтобы при транспортировке и подъёмах ввода не наблюдалось смещение фарфора относительно стержня. Между фарфором и металлическими деталями располагаются прокладки из маслостойкой резины.

По конструктивному исполнению вводы делятся на герметичные и негерметичные. В верхней части негерметичных вводов устанавливается расширитель для компенсации расширения масла. Он снабжён гидрозатвором, воздухоосушителем и указателем уровня масла. В герметичных вводах имеются компенсаторы давления, встроенные в конструкцию или выполненные в виде выносных баков давления. Бак давления соединён с вводом гибким трубопроводом.

При напряжении выше 35 кВ применяются вводы с маслобарьерной, бумажно-бакелитовой и конденсаторной бумажно-масляной внутренней изоляцией. Наружной изоляцией таких вводов являются фарфоровые покрышки, в которые помещаются остовы вводов. В последнее время для комплектных распределительных устройств выпускаются вводы с элегазовой изоляцией на напряжение 110...220 кВ.

Маслобарьерные вводы (МБВ). МБВ являются устаревшими конструкциями и применяются в энергетических установках на напряжение до 400 кВ. Конструктивное исполнение вводов с маслобарьерной изоляцией показано на рис. 1.

Основной изоляцией таких вводов является трансформаторное масло, в котором между токоведущим стержнем и фланцем расположены бумажно-бакелитовые цилиндры с конденсаторными обкладками из медной или алюминиевой фольги толщиной 0,01...0,015 мм, с бумажным покрытием толщиной до 3...5 мм.

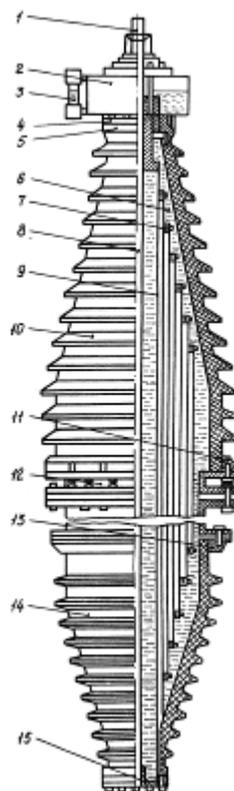


Рисунок. 1. Маслобарьерный ввод на напряжение 220 кВ:

1 – токовый зажим; 2 – расширитель; 3 – указатель уровня масла; 4 – поддон; 5 – фланец; 6 – трансформаторное масло; 7 – распорки дистанционные; 8 – токоведущий стержень; 9 – бумажно-бакелитовые цилиндры; 10 – крышка верхняя; 11 – фланец; 12 – соединительная втулка; 13 – фланец; 14 – крышка нижняя; 15 – стакан

Применение конденсаторных обкладок позволяет выравнивать поле как в радиальном, так и в аксиальном направлениях при соответствующем законе изменения длины и радиуса обкладок. Изоляционные цилиндры крепятся с помощью дистанционных распорок из дерева (красного бука) или пластмассы. Трансформаторное масло, циркулируя в кольцевых зазорах (толщиной 2...5 см) между барьерами, охлаждает токоведущий стержень и способствует отводу тепла от изоляционных перегородок.

Ввод снабжен расширителем и указателем уровня масла. МБВ отличаются высокой надежностью, но имеют большие габариты из-за относительно больших масляных зазоров между цилиндрическими барьерами [1]. В зависимости от толщины масляного канала и размеров конденсаторных обкладок допустимые напряженности в масле не должны превышать 40...65 кВ/см.

Диаметр токоведущего стержня (трубы) и его сечение должны обеспечить необходимую величину максимальной напряженности на стержне ($E_{\max} \leq E_{\text{доп}}$) и пропускание тока заданной величины с учетом допустимой плотности тока.

Вводы конденсаторного типа. Применение во вводах маслобарьерной изоляции дало возможность повысить их электрическую прочность, но габариты вводов остаются значительными, что существенно затрудняет их использование при напряжении 220...500 кВ и выше. Поэтому на высших классах напряжения применяются технически более совершенные вводы конденсаторного типа, к которым относятся бумажно-бакелитовые и бумажно-масляные конденсаторные вводы. В качестве основной изоляции в бумажно-бакелитовых вводах (вводы с твердой изоляцией) используется бакелизированная бумага толщиной 0,06 мм, которая наматывается на токоведущий стержень или трубу в горячем состоянии при температуре до 160 °С.

Между слоями бумаги через определенные промежутки закладываются уравнивающие обкладки из алюминиевой фольги. Полученная втулка запекается, концы остова обтачиваются на станке с целью придания изолятору определенной формы (чаще конусной), а затем поверхность изоляционного остова покрывается влагостойким лаком (рис. 3.17). Такие вводы отличаются простотой изготовления, компактностью, высокой механической прочностью.

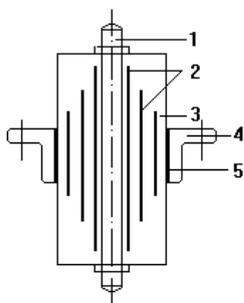


Рисунок 2. Конденсаторный бумажно-бакелитовый ввод для внутренней установки: 1 – токоведущий стержень; 2 – конденсаторные обкладки; 3 – бакелизированная бумага; 4 – металлический фланец; 5 – цементная заделка

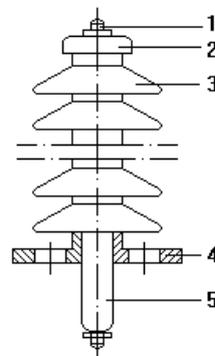


Рисунок 3. Бакелитовый ввод с полимерной крышкой: 1 – токоведущий стержень; 2 – верхний колпачок; 3 – крышка из силиконовой резины (верхняя часть изолятора); 4 – средний фланец; 5 – нижняя (масляная) часть изолятора

К их недостаткам следует отнести гигроскопичность изоляции, вследствие чего она может отсыревать из-за растрескивания лака, низкую трекинговость, возможность теплового пробоя.

Бумажно-бакелитовые изоляторы для наружной установки помещают в фарфоровые покрышки, а пространство между покрышкой и изоляционным остовом заливают специальной мастикой. Если нижняя часть ввода работает в масле (трансформаторы, масляные выключатели), то нижняя фарфоровая покрышка отсутствует. В этом случае нижняя часть изолятора короче наружной [1–3].

Московский завод «Изолятор» выпускает вводы с бумажно-бакелитовой изоляцией до 500 кВ (***РВР-изоляция***). В последние годы это предприятие выпускает бакелитовые вводы типа ГТТБ-35/1000 с полимерной внешней изоляцией (рис. 3). Внешняя изоляция (покрышка) изготовлена из трекинговостойкой силиконовой резины в грязестойком исполнении. Покрышка на 35 кВ имеет 7 тонких ребер, что позволяет выдерживать большие ударные механические нагрузки.

В настоящее время широкое распространение получили наиболее совершенные вводы с конденсаторной бумажно-масляной изоляцией. В данной конструкции ввода на токоведущий стержень (трубу) или на бумажно-бакелитовый цилиндр наматывается кабельная бумага марки КВ-120 шириной 100...150 мм по способу спиральной намотки с положительным перекрытием. Через определенные промежутки между слоями бумаги закладываются конденсаторные обкладки из перфорированной алюминиевой фольги толщиной 0,01 мм.

При более совершенной технологии применяется намотка в два слоя бумаги: одного – чистого, другого – с печатным металлическим покрытием. Затем производится тщательная вакуумная сушка остова ввода и последующая пропитка дегазированным трансформаторным маслом. На следующем этапе изоляционный остов ввода помещается в фарфоровые чехлы (верхняя и нижняя покрышки), залитые трансформаторным маслом. Для соединения верхней и нижней частей ввода используется металлическая соединительная втулка.

В верхней части ввода (рис. 4) к фланцу крепится маслорасширитель с указателем уровня масла, который может снабжаться гидрозатвором для предотвращения увлажнения масла.

Современные конструкции вводов выполняются герметичными, что позволяет избежать увлажнения и окисления масла атмосферным воздухом. Такие вводы имеют встроенные (вводы 110...220 кВ) или выносные (вводы 220 кВ и выше) баки давления

(компенсаторы), которые соединяются медным трубопроводом длиной 3...6 м с внутренней полостью ввода через соединительную втулку [4, 5].

В последние годы завод «Изолятор» освоил выпуск новых трансформаторных вводов на 330...500 кВ с компенсатором давления в верхней части ввода.

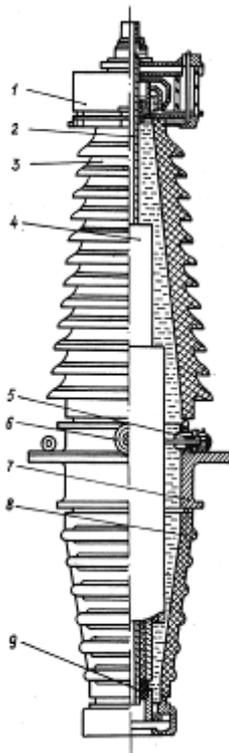


Рисунок 4. Конденсаторный бумажно-масляный ввод типа БМТ- 110/630: 1 – расширитель с гидрозатвором; 2 – токоведущая труба; 3 – верхняя крышка; 4 – изоляционный остов; 5 – измерительный ввод; 6 – маслоотборник; 7 – соединительная втулка; 8 – нижняя крышка; 9 – стакан

Некоторые маслonaполненные вводы снабжены приспособлением для измерения напряжения (ПИН). Для присоединения ПИН используются две уравнивающие обкладки сердечника – последняя заземленная и предпоследняя, которая присоединяется к выводу ПИН. Эти две обкладки ввода образуют низковольтное плечо емкостного делителя. В современных конструкциях вводов вывод для присоединения ПИН может быть использован для измерения $\text{tg}\delta$ и емкости ввода. Для контроля качества масла вводы имеют маслоотборное устройство, расположенное на соединительной втулке.

Фарфоровые крышки ввода конструируются таким образом, чтобы получить наибольшее значение разрядных напряжений в эксплуатационных условиях.

Изготовление вводов с бумажно-масляной изоляцией является сложным процессом и требует большой тщательности. ЗАО «АББ Электроизолит Бушинг» освоило выпуск

высоковольтных вводов (по швейцарской технологии) с твердой RIP-изоляцией на $U = 500$ кВ, $I_n = 800 \dots 2500$ А (абсолютно сухие) с заполнением компаундом типа «Микагель».

RIP-изоляция изготовлена на основе бумаги, пропитанной в вакууме эпоксидным компаундом. Такая изоляция сочетает в себе высокие диэлектрические характеристики, присущие бумажно-масляной изоляции, и удобство в эксплуатации, характерное для твердой изоляции. RIP-изоляция обладает высокой термической и механической стойкостью. Недостатком вводов с RIP-изоляцией является их достаточно высокая стоимость по сравнению с бумажно-масляными вводами (OIP-изоляция).

Вводы с элегазовой изоляцией. Применение высокопрочных газов в качестве электрической изоляции позволяет существенно упростить конструкцию вводов и уменьшить их массу и габариты. Газ, используемый в качестве внутренней изоляции, должен обладать не только высокой электрической прочностью, но и достаточной термической стойкостью, малой токсичностью, стойкостью к электрическим разрядам, низкой температурой сжижения, приемлемой стоимостью [4].

Наиболее полно указанным требованиям отвечает элегаз (SF_6 – шестифтористая сера). Элегаз прочнее воздуха в 2,3–2,6 раза и не разлагается под действием воды, кислот, щелочей. По своей инертности элегаз близок к химически чистому азоту. Для снижения стоимости изделий с элегазовой изоляцией в ряде случаев используют смесь элегаза с азотом. Элегаз рекомендуется применять только в однородном или слабонеоднородном электрических полях, т. к. при ионизационных процессах наблюдается разложение элегаза с образованием весьма опасных необратимых соединений.

Отечественной промышленностью разработаны вводы с элегазовой изоляцией, предназначенные для установок в КРУ (рис. 5) на напряжение 110...220 кВ.

Маслобарьерная изоляция. Барьером называется тонкая перегородка определенной формы (чаще плоской или цилиндрической) из твердого диэлектрика, помещаемая в масляный промежуток. При этом барьер затрудняет образование сплошных проводящих мостиков из примесей, а в резконеоднородных полях способствует также выравниванию поля, что и приводит к увеличению электрической прочности промежутка.

Наиболее широкое распространение маслобарьерная изоляция (МБИ) получила в конструкциях трансформаторов и маслобарьерных вводов.

Расчет пробивного напряжения масло барьерной изоляции применяемой в трансформаторах, проводится по уравнению

$$U_{\text{пр}} = A \left(1 + \frac{2,14}{\sqrt{S}} \right) \cdot S \text{ кВ} \quad (1)$$

При одноминутном воздействии переменного напряжения промышленной частоты $A=28,5$; для срезанного импульса - $A=93,2$; для полной импульсной волны - $A=82,5$; S -толщина маслобарьерной изоляции, см.

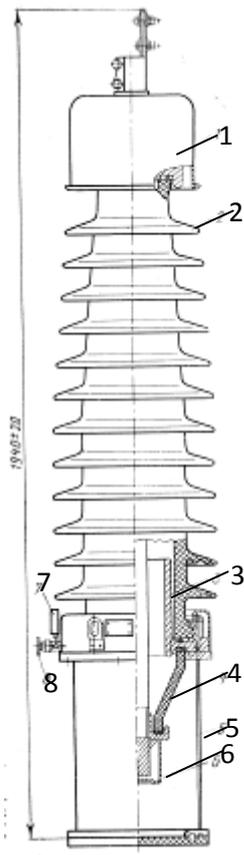


Рисунок 5. Газонаполненный ввод на напряжение 110 кВ: 1 – защитный кожух; 2 – верхняя фарфоровая покрывка; 3 – экран внутренний; 4 – нижняя изолирующая покрывка; 5 – защитный кожух; 6 – экран наружный; 7 – манометр; 8 – вентиль

В маслобарьерных вводах такая изоляция представляет собой чередование цилиндров и каналов, по которым циркулирует масло, охлаждая токоведущий стержень и барьеры. Электрическая прочность маслобарьерных вводов определяется максимальной напряженностью поля в масле вблизи токоведущего стержня.

Для более равномерного распределения напряжения в радиальном и аксиальном направлениях поверх изоляционных цилиндров накладываются конденсаторные обкладки, причем емкости отдельных слоев должны быть равными, тогда на каждый слой будет приходиться равное падение напряжения.

При регулировании поля в радиальном направлении принимают толщину слоя постоянной, а длину уступа переменной при обеспечении равенства емкостей слоев. При таком способе регулирования аксиальное распределение напряжения является крайне неравномерным, и разрядное напряжение изолятора снижается.

При этом одновременно происходит и некоторое выравнивание напряженностей в радиальном направлении, что позволяет уменьшить габариты и повысить разрядные характеристики изолятора.

Расчет внутренней изоляции маслобарьерного ввода проводится следующим образом. Задавшись числом промежуточных обкладок n (в зависимости от номинального напряжения 1-8) при равномерном распределении напряжения между ними, определяют напряжение, приходящееся на один канал между обкладками

$$U_k = \frac{1,1 \cdot U_{схв}}{n} \text{ кВ} \quad (2)$$

где $U_{схв}$ - суховыдерживаемое напряжение изолятора, кВ.

Затем определяется максимальная напряженность поля в слое масла в каждом канале ввода, которая не должна превосходить допустимые значения ($E_{доп} = 40-65 \text{ кВ/см}$). Считается, что пробой слоя масла приводит к пробое всего ввода.

На рис. 6 представлен эскиз изоляционного канала масло-барьерного ввода.

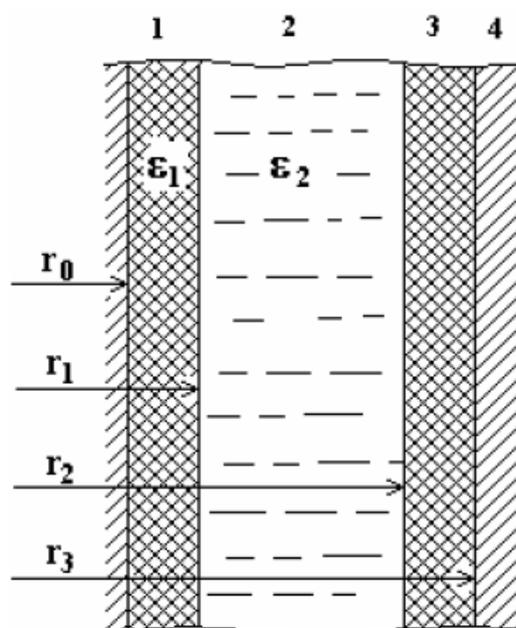


Рисунок 6. Эскиз маслобарьерного канала:

1 - бумажное покрытие, 2 - трансформаторное масло, 3 - барьер, 4 - конденсаторная обкладка.

Максимальная напряженность в слое масла

$$E_{max 2} = \frac{U_2}{r_1 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{U_k}{r_0 \cdot \varepsilon_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\varepsilon_3} \ln \frac{r_3}{r_2} \right)} \quad (3)$$

где U_2 - напряжение на слое масла: $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ - диэлектрические проницаемости бумажного покрытия, масла и материала барьера, соответственно.

При испытательном напряжении допустимая напряженность в слое масла не должна превышать значения, определенных из уравнения

$$E_{доп} = \frac{62}{\left(r \cdot \ln \frac{R}{r} \right)^{0,32}}, \text{ кВ/см} \quad (4)$$

где r, R - минимальный и максимальный радиусы слоя, см.

Радиус токоведущего стержня для конденсаторного ввода определяется из условия минимума максимальной напряженности поля

$$r_0 = \frac{1,8U}{3,6E_{r \max}}, \text{ см} \quad (5)$$

где U - расчетное напряжение .кВ ($U = 1,1U_{схв}$):

$E_{r \max}$ - расчетный максимальный градиент. кВ/см. определяемый из формулы

$$E_{r \max} = E_{r \text{ раб}} \frac{U}{U_{\text{раб}}}, \text{ кВ/см} \quad (6)$$

где $E_{r \text{ раб}}$ - радиальный рабочий градиент, кВ/см. Для бумажно-масляных конденсаторных вводов $E_{r \text{ раб}} = 30—50$ кВ/см.

$U_{\text{раб}}$ - наибольшее рабочее напряжение, кВ.

Для систем с глухим заземлением нейтрали ($U_H > 110$ кВ)

$$U_{\text{раб}} = \frac{(1,1-1,15)U_H}{\sqrt{3}}, \text{ кВ} \quad (7)$$

Для систем с изолированной нейтралью ($U_H < 35$ кВ)

$$U_{\text{раб}} = (1,1 - 1,15)U_{\text{раб}}, \text{ кВ} \quad (8)$$

Радиус стержня, полученный расчетным путем, необходимо проверить по токовой нагрузке. Проверка производится по допустимой плотности тока $j_{\text{доп}}$ для токоведущих стержней вводов.

Обычно токоведущие стержни выполняются в виде латунных или медных труб (стержней).

Исходя из токовой нагрузки радиус токоведущего стержня может быть найден из выражения

$$I_n = j_{\text{доп}} \cdot \pi \cdot r_0^2, \text{ A} \quad (9)$$

где I_n - номинальный ток. А: $j_{\text{доп}}$ - допустимая плотность тока ($j_{\text{доп}} = 1,0 - 1,5 \text{ A/мм}^2$), r_0 - радиус стержня.

В результате расчета по формулам (5 и 9) должен быть выбран стержень (труба) с размерами, удовлетворяющими требованиям как по минимальной напряженности, так и по допустимой плотности тока.

Пример решения задачи

Задача 1

Рассчитать изоляцию высоковольтного ввода номинальным напряжением $U_{\text{ном}} = 110 \text{ кВ}$; $I_{\text{ном}} = 200 \text{ А}$; $E_h = \text{const}$. Используется вариант расчёта с постоянной продольной напряжённостью (получаем минимальные размеры продольной составляющей).

1. Разрядное расстояние вдоль фарфоровой покрышки в верхней части ввода H_B определяется по следующей формуле:

$$H_B = 0,865 \cdot U_u^{1,3} = 0,865 \cdot 230^{1,3} = 1017 \text{ мм.}$$

где $U_u = U_{\text{расч}} = U_{50 \text{ Гц } 1 \text{ мин}} = 230 \text{ кВ}$

2. Определим разрядное расстояние по поверхности изоляции в верхней части ввода h_e .

Эта длина выбирается несколько меньше. Этим достигается экранировка верхней части ввода и фланца, что затрудняет образование скользящих разрядов на наружной поверхности

$$h_e = 0,75 \cdot H_B = 0,75 \cdot 1017 = 763 \text{ мм.}$$

3. Определим разрядное расстояние вдоль поверхности изоляции в нижней части ввода h_n .

Все продольные размеры внутри и нижней фарфоровой крышки будем рассчитывать на одноминутное испытательное напряжение промышленной частоты:

$$h_n = 5 + 1,26 \cdot U_u + 0,00102 \cdot U_u^2 = 5 + 1,26 \cdot 230 + 0,00102 \cdot 230^2 = 349 \text{ мм.}$$

4. Определим разрядное расстояние по фарфоровой покрышке в нижней части ввода H_n .

$$H_n = \frac{h_n}{0,75} = \frac{349}{0,75} = 465 \text{ мм.}$$

5. Определим аксиальные допустимые напряженности по установленным значениям h_B и h_H .

в верхней части ввода E_{h_g} :

$$E_{h_g} = \frac{U_{расч}}{h_g} = \frac{230}{763} = 0,3 \frac{\text{кВ}}{\text{мм}}.$$

- в нижней части ввода E_{h_n} :

$$E_{h_n} = \frac{U_{расч}}{h_n} = \frac{230}{349} = 0,66 \frac{\text{кВ}}{\text{мм}}.$$

- приведенную аксиальную напряженность E_h :

$$E_h = \frac{U_{расч}}{(h_g + h_n)} = \frac{230}{1112} = 0,21 \frac{\text{кВ}}{\text{мм}}.$$

6. Определим длину фланцевой обкладки h_ϕ :

$$h_\phi = \frac{U_{расч}}{E_h} \cdot \frac{1}{(z-1)} = \frac{230}{0,21 \cdot (3,6-1)} = 421 \text{ мм};$$

$$h_c = z \cdot h_\phi = 3,6 \cdot 421 = 1516 \text{ мм},$$

где $z = \frac{h_{cm}}{h_\phi} = 3,6$ - при этом обеспечивается наименьший расход материала.

Принимаем вариант расчета с манжетами.

Возьмём 3 манжета, с $\Delta r' = 1$ мм. Следовательно $\Delta r_{\min} = 4$ мм.

7. Определяем допустимую рабочую напряженность без учета неравномерности распределения напряженности по манжетам $E'_{r \text{ раб.}}$.

Выбор радиальных напряженностей в изоляторах конденсаторного типа определяется в основном характеристиками частичных разрядов.

$$E'_{r \text{ раб.}} = 4 \cdot \left| \Delta r' \right|^{-0,58} = 4 \frac{\text{кВ}}{\text{мм}}.$$

Определим допустимую испытательную напряженность без учета неравномерности распределения $E'_{r_{исп}}$.

$$E'_{r_{исп.}} = 12 \cdot \left| \Delta r' \right|^{-0.58} = 12 \frac{\kappa B}{\text{мм}}.$$

8. Учет коэффициент неравномерности распределения напряженности по манжетам. Использование манжетов во всем изоляторе невозможно, из-за неравномерности распределения напряжённости по манжетам. Но это возможно при малом количестве манжетов, с использованием коэффициента неравномерности $k_{н1} = 1,25$.

$$E_{r_{раб.}} = \frac{E'_{r_{раб}}}{k_{н1}} = \frac{E'_{r_{раб}}}{1,25} = 3,2 \frac{\kappa B}{\text{мм}}.$$

$$E_{r_{испыт}} = \frac{E'_{r_{исп.}}}{k_{н1}} = \frac{E'_{r_{исп.}}}{1,25} = 9,6 \frac{\kappa B}{\text{мм}}.$$

После использование коэффициента о манжетах можно забыть.

9. Определим $U_{расч.}$ для радиальных размеров остова.

$$\frac{U_{исп}}{U_{раб}} = \frac{230}{73} = 3,15 > \frac{E_{r_{исп}}}{E_{r_{раб}}} = \frac{9,6}{3,2} = 3,$$

где $U_{\phi, раб. наиб.} = \frac{U_{наиб. раб. л.}}{\sqrt{3}} = \frac{126}{\sqrt{3}} = 73 \kappa B.$

Таким образом принимаем $U_{расч} = U_{исп} = 230 \kappa B.$

10. Определим радиус стержня r_c :

$$r_c = \frac{U_{расч.}}{2E_{rc}} \frac{\left(\frac{h_{\phi}}{h_c} + 1\right)}{\left(\ln\left(\frac{h_c}{h_{\phi}}\right) + \ln \alpha\right)} = \frac{230\left(1 + \frac{1}{3,6}\right)}{2 \cdot 9,6(\ln 3,6 + \ln 1)} = \frac{293,8}{24,57} = 12 \text{ мм}.$$

где $\alpha = \frac{E_{rc}}{E_{r\phi}} = 1$ - коэффициент запаса.

Принимаем стандартный радиус стержня: $r_c = 13 \text{ мм}.$

Расчет радиуса фланца r_ϕ :

$$r_\phi = r_c \left(\frac{r_h}{r_\phi} \right)^\alpha = 13 \cdot 3,6 \cdot 1 = 46,8 \text{ мм},$$

11. Определим число конденсаторных обкладок m :

$$m = \frac{U_{расч}}{E_{r\text{ доп}}} \cdot \frac{1}{\Delta r_{\min}} = \frac{230}{9,6} \cdot \frac{1}{4} = 6;$$

Принимаем $m = 6$.

12. Определим длину уступа в верхней части λ_g :

$$\lambda_g = \frac{h_g}{m} = \frac{763}{6} = 127 \text{ мм};$$

13. Определим длину уступа в нижней части λ_H :

$$\lambda_H = \frac{h_H}{m} = \frac{349}{6} = 58 \text{ мм};$$

14. Определим расчетную длину уступа λ

$$\lambda = \lambda_g + \lambda_H = 185 \text{ мм}.$$

15. Определим расчетную длину стержня h_C :

$$h_C = h_B + h_H + h_\phi = 1533 \text{ мм}$$

16. Определим длины конденсаторных обкладок h_k .

$$h_k = h_C - k\lambda ;$$

$$h_1 = h_C - \lambda = 1348 \text{ мм} \quad - \text{ длина первой обкладки};$$

$$h_2 = h_C - 2\lambda = 1163 \text{ мм} \quad - \text{ длина второй обкладки};$$

$$h_3 = h_C - 3\lambda = 978 \text{ мм} \quad - \text{ длина третьей обкладки};$$

$$h_4 = h_C - 4\lambda = 793 \text{ мм} \quad - \text{ длина четвертой обкладки};$$

$$h_5 = h_c - 5\lambda = 608 \text{ мм} \quad - \text{длина пятой обкладки};$$

$$h_6 = h_c - 6\lambda = 423 \text{ мм} \quad - \text{длина шестой обкладки};$$

17. Определим падение напряжения на слое ΔU :

$$\Delta U = \frac{U_{расч}}{m} = \frac{230}{7} = 38,3 \text{ кВ}.$$

18. Определим постоянную A :

$$A = \frac{\Delta U}{h_1 E_{rc} r_c} = \frac{37,8}{1348 \cdot 9,6 \cdot 13} = 2,28 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{мм}}.$$

19. Определим радиусы конденсаторных обкладок r_k :

$$r_k = r_{k-1} e^{Ah_k};$$

$$r_1 = 17,7 \text{ мм} \quad - \text{радиус первой обкладки};$$

$$r_2 = 23,1 \text{ мм} \quad - \text{радиус второй обкладки};$$

$$r_3 = 28,9 \text{ мм} \quad - \text{радиус третьей обкладки};$$

$$r_4 = 34,6 \text{ мм} \quad - \text{радиус четвертой обкладки};$$

$$r_5 = 39,4 \text{ мм} \quad - \text{радиус пятой обкладки};$$

$$r_6 = r_\phi = 43,3 \text{ мм} \quad - \text{радиус шестой (фланцевой) обкладки};$$

20. При использовании кабельной бумаге толщиной 0.12 мм и намотке изоляции вполнахлёста толщина одного слоя намотки $d = 2 \cdot 0,12 \approx 0,25$ мм . В связи с этим все размеры толщин слоёв изоляции Δr_k должны быть кратны значению 0,25 мм.

Определим толщины

слоев изоляции: _____

Принимаем: _____

$$\Delta r_1 = r_1 - r_c = 4,67 \text{ мм};$$

$$\Delta r_1 = 4 \text{ мм};$$

$$\Delta r_2 = r_2 - r_1 = 5,4 \text{ мм};$$

$$\Delta r_2 = 5 \text{ мм};$$

$$\Delta r_3 = r_3 - r_2 = 5,8 \text{ мм};$$

$$\Delta r_3 = 6 \text{ мм};$$

$$\Delta r_4 = r_4 - r_3 = 5,7 \text{ мм};$$

$$\Delta r_4 = 6 \text{ мм};$$

$$\Delta r_5 = r_5 - r_4 = 4,8 \text{ мм};$$

$$\Delta r_5 = 5 \text{ мм};$$

$$\Delta r_6 = r_6 - r_5 = 3,9 \text{ мм};$$

$$\Delta r_6 = 4 \text{ мм};$$

21. В связи с скорректированными значениями Δr_k должны быть уточнены значения r_k , которые определяются следующим образом:

$$r_k = r_{k-1} + \Delta r_k,$$

$$r_1 = r_c + \Delta r_1 = 17 \text{ мм}$$

- радиус первой обкладки;

$$r_2 = r_1 + \Delta r_2 = 22 \text{ мм}$$

- радиус второй обкладки;

$$r_3 = r_2 + \Delta r_3 = 28 \text{ мм}$$

- радиус третьей обкладки;

$$r_4 = r_3 + \Delta r_4 = 34 \text{ мм}$$

- радиус четвертой обкладки;

$$r_5 = r_4 + \Delta r_5 = 39 \text{ мм}$$

- радиус пятой обкладки;

$$r_6 = r_5 + \Delta r_6 = 43 \text{ мм}$$

- радиус шестой (фланцевой) обкладки;

На рис. 4.1, построим график функции $\Delta r_k(k)$

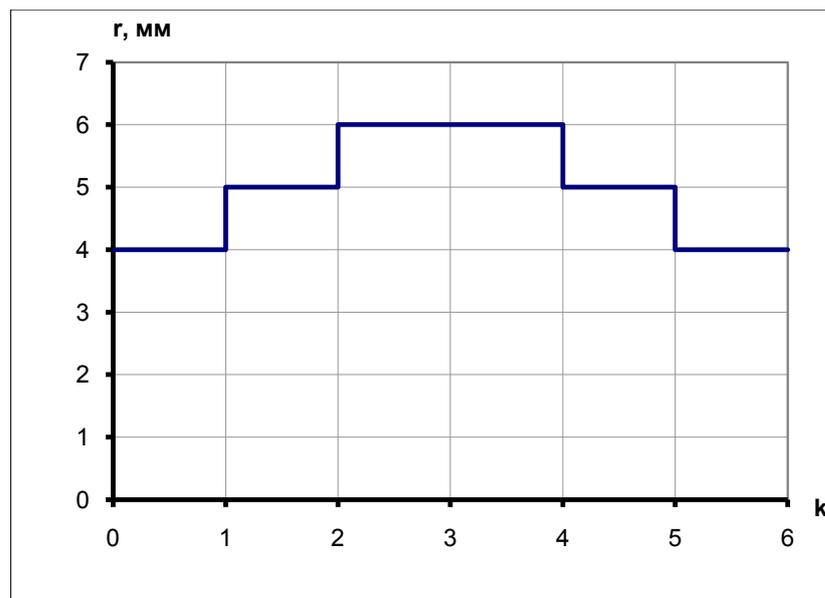


Рис.4.1. Зависимость Δr_k от номера слоя k

22. Определим емкость слоев C_k

$$C_k = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot h_k}{\ln \frac{r_k}{r_{k-1}}};$$

$$C_1 = \frac{2\pi \cdot 3,75\varepsilon_0 \cdot h_1}{\ln \frac{r_1}{r_0}} = \frac{2\pi \cdot 3,75 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1,348}{\ln \frac{17}{13}} = 1,046 \cdot 10^{-9} \phi;$$

$$C_2 = \frac{2\pi \cdot 3,75\varepsilon_0 \cdot h_2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{2\pi \cdot 3,75 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1,163}{\ln \frac{22}{17}} = 0,941 \cdot 10^{-9} \phi;$$

$$C_3 = \frac{2\pi \cdot 3,75\varepsilon_0 \cdot h_3}{\ln \frac{r_3}{r_2}} = \frac{2\pi \cdot 3,75 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,978}{\ln \frac{28}{22}} = 0,848 \cdot 10^{-9} \phi;$$

$$C_4 = \frac{2\pi \cdot 3,75\varepsilon_0 \cdot h_4}{\ln \frac{r_4}{r_3}} = \frac{2\pi \cdot 3,75 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,793}{\ln \frac{34}{28}} = 0,851 \cdot 10^{-9} \phi;$$

$$C_5 = \frac{2\pi \cdot 3,75\varepsilon_0 \cdot h_5}{\ln \frac{r_5}{r_4}} = \frac{2\pi \cdot 3,75 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,608}{\ln \frac{39}{34}} = 0,923 \cdot 10^{-9} \phi;$$

$$C_6 = \frac{2\pi \cdot 3,75\varepsilon_0 \cdot h_6}{\ln \frac{r_6}{r_5}} = \frac{2\pi \cdot 3,75 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,423}{\ln \frac{43}{39}} = 0,903 \cdot 10^{-9} \phi.$$

23. Определим падение напряжения в слоях ΔU_k .

$$\Delta U_k = \frac{U_{расч}}{C_k \cdot \sum_{i=1}^m \frac{1}{C_i}};$$

Определим сумму величин обратно пропорциональных емкостям.

$$\Delta U_1 = \frac{U_{расч}}{C_1 \cdot \sum_{i=1}^m \frac{1}{C_i}} = \frac{230 \cdot 10^3}{1,05 \cdot 10^{-9} \cdot 6,5167 \cdot 10^9} = 33,35 \text{ кВ};$$

$$\Delta U_2 = \frac{U_{расч}}{C_2 \cdot \sum_{i=1}^m \frac{1}{C_i}} = 37,3 \text{ кВ};$$

$$\Delta U_3 = \frac{U_{расч}}{C_3 \cdot \sum_{i=1}^m \frac{1}{C_i}} = 41,5 \text{ кВ};$$

$$\Delta U_4 = \frac{U_{расч}}{C_4 \cdot \sum_{i=1}^m \frac{1}{C_i}} = 41,5 \text{ кВ};$$

$$\Delta U_5 = \frac{U_{расч}}{C_5 \cdot \sum_{i=1}^m \frac{1}{C_i}} = 38,4 \text{ кВ};$$

$$\Delta U_6 = \frac{U_{расч}}{C_6 \cdot \sum_{i=1}^m \frac{1}{C_i}} = 39,2 \text{ кВ}.$$

После определения длин и радиусов конденсаторных обкладок изолятора следует произвести проверочный расчёт максимальной и минимальной напряжённости в слое.

24. Определим максимальную радиальную напряженность в слоях E_{rk} и минимальную радиальную напряженность E'_{rk} :

$$E_{rk} = \frac{\Delta U_k}{r_{k-1} \cdot \ln \frac{r_k}{r_{k-1}}};$$

$$E'_{rk} = \frac{\Delta U_k}{r_k \cdot \ln \frac{r_k}{r_{k-1}}};$$

$$E_{r1} = \frac{\Delta U_1}{r_0 \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}} = \frac{33,35}{13 \cdot \ln \frac{17}{13}} = 9,56 \frac{\text{кВ}}{\text{мм}};$$

$$E'_{r1} = 7,31 \text{ кВ/мм};$$

$$E_{r2} = \frac{\Delta U_2}{r_1 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} = 8,51 \frac{\text{кВ}}{\text{мм}};$$

$$E'_{r2} = 6,58 \text{ кВ/мм};$$

$$E_{r3} = \frac{\Delta U_3}{r_2 \cdot \ln \frac{r_3}{r_2}} = 7,82 \frac{\text{кВ}}{\text{мм}};$$

$$E'_{r3} = 6,15 \text{ кВ/мм};$$

$$E_{r4} = \frac{\Delta U_4}{r_3 \cdot \ln \frac{r_4}{r_3}} = 7,63 \frac{\text{кВ}}{\text{мм}};$$

$$E'_{r4} = 6,29 \text{ кВ/мм};$$

$$E_{r5} = \frac{\Delta U_5}{r_4 \cdot \ln \frac{r_5}{r_4}} = 8,23 \frac{\text{кВ}}{\text{мм}};$$

$$E'_{r5} = 7,18 \text{ кВ/мм};$$

$$E_{r6} = \frac{\Delta U_6}{r_5 \cdot \ln \frac{r_6}{r_5}} = 10,3 \frac{\text{кВ}}{\text{мм}}.$$

$$E'_{r6} = 9,34 \text{ кВ/мм}.$$

При этом максимальные напряжённости в первом и последнем слое должны совпасть с заданными E_{rc} и $E_{r\phi}$.

Таблица 1.

№ слоя	$r, \text{мм}$	$h, \text{мм}$	C, ϕ	$\Delta U_k, \text{кВ}$	$E_{rk}, \frac{\text{кВ}}{\text{мм}}$	$E'_{rk}, \frac{\text{кВ}}{\text{мм}}$
с	13					
1	17	1348	$1,05 \cdot 10^{-9}$	33,35	9,56	7,31
2	22	1163	$0,94 \cdot 10^{-9}$	37,3	8,51	6,58
3	28	978	$0,85 \cdot 10^{-9}$	41,5	7,82	6,15
4	34	793	$0,85 \cdot 10^{-9}$	41,5	7,63	6,29
5	39	608	$0,92 \cdot 10^{-9}$	38,4	8,23	7,18
6 (ф)	43	423	$0,93 \cdot 10^{-9}$	39,2	10,3	9,34

На рисунке 4.2, построим график функции $E_r(k)$.

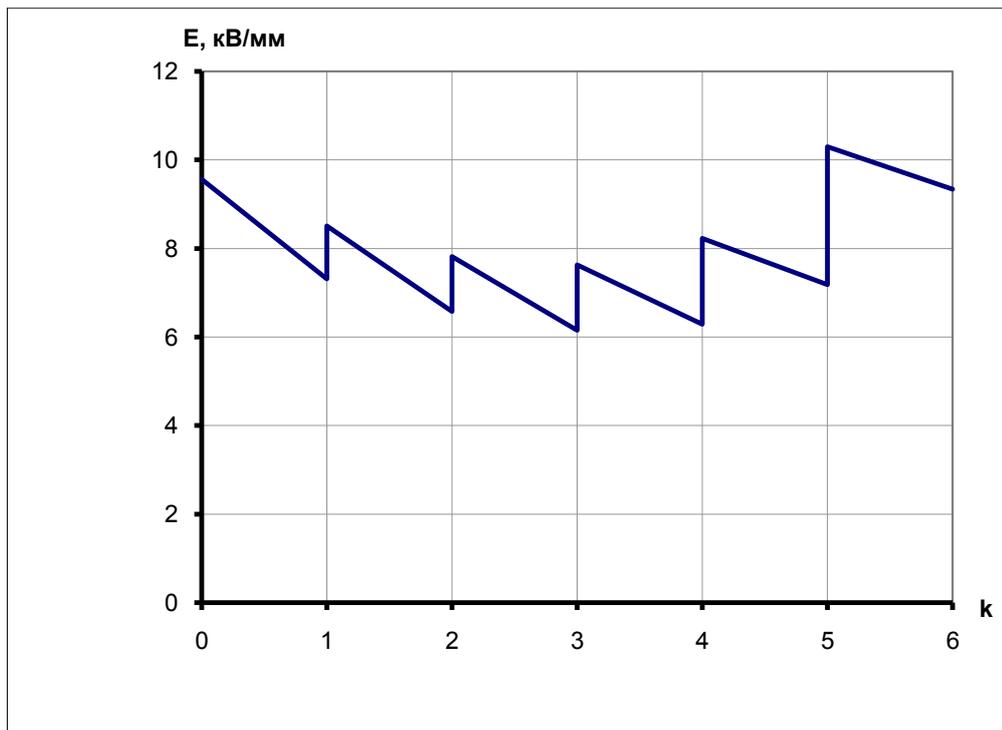


Рис.4.2. Значения радиальных напряженностей в слоях изолятора

Из графика, приведенного на рис.4.2, видно что условие $E_{г\ max} \leq E_{г\ доп}$ выполнено, следовательно расчет закончен.

Примеры для самостоятельного решения

Пример 1. Построить эпюры напряженностей электрического поля в слоях маслобарьерного ввода номинальным напряжением 220 кВ и провести анализ регулирования поля в радиальном и аксиальном направлениях с помощью конденсаторных обкладок по методу постоянства максимальных градиентов в радиальном направлении

Пример 2. Построить эпюры напряженностей электрического поля в слоях маслобарьерного ввода номинальным напряжением 35 кВ и провести анализ регулирования поля в радиальном и аксиальном направлениях с помощью конденсаторных обкладок по методу постоянства максимальных градиентов в радиальном направлении

Практическая работа № 5

Изоляция высоковольтных конденсаторов

Краткие теоретические сведения

Название «конденсатор» было введено в конце XVIII в., когда существовало представление об «электрических жидкостях» и конденсатор рассматривался как прибор для сгущения, конденсирования этих жидкостей. Конденсатор представляет собой систему из двух или более проводников (обкладок), разделенных диэлектриком. Основное назначение конденсатора – накапливать электрический заряд и энергию.

Первые специально созданные электрические конденсаторы, которые применяли в России М.В. Ломоносов и Г. Рихман, представляли собой стеклянные банки, наполненные водой или дробью и оклеенные снаружи фольгой. Впервые понятие диэлектрической проницаемости диэлектрика в конденсаторах ввел Фарадей, в честь которого и названа единица емкости Фарада. В настоящее время в России производятся все виды современных электрических конденсаторов – от единиц до долей пикофарад.

Важнейшая характеристика конденсатора – удельная энергия, равная отношению запасенной в конденсаторе электрической энергии к объему активного диэлектрика:

$$w = \frac{W}{V} = \frac{CU^2}{Sd} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r SU^2}{2d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r U^2}{2d^2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r E^2}{2}, \quad (1)$$

где S – площадь пластин конденсатора; d – толщина диэлектрика.

Как следует из формулы (2.2), для увеличения удельной энергии следует выбирать материал с высокой диэлектрической проницаемостью и высокой электрической прочностью.

Из формулы (1) можно выразить энергию конденсатора:

$$W = wV = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r E^2}{2} Sd \equiv l^3, \quad (2)$$

где l – линейные размеры конденсатора.

Как видно из формулы (2.3), энергия конденсатора, а следовательно, и потери растут пропорционально кубу линейных размеров. Поверхность охлаждения конденсатора

растет пропорционально квадрату линейных размеров. Следовательно, с ростом мощности конденсатора ухудшаются условия его охлаждения. Чтобы не вызвать перегрева диэлектрика, необходимо использовать материал с малыми диэлектрическими потерями, т. е. с малым значением $tg\delta$. Рассмотрим с учетом сказанного, как выполняется изоляция в различных видах конденсаторов.

Классификация конденсаторов

Конденсаторы с неорганическим диэлектриком

Конденсаторы с неорганическим диэлектриком можно разделить на три группы: низковольтные, высоковольтные и помехоподавляющие. В качестве диэлектрика в них используется керамика, стекло, стекломаль, стеклокерамика и слюда. Обкладки выполняются в виде тонкого слоя металла, нанесённого на диэлектрик путем непосредственной его металлизации, или в виде тонкой фольги.

Группа **низковольтных конденсаторов** включает в себя низкочастотные и высокочастотные конденсаторы. По назначению они подразделяются на три типа: тип 1 — конденсаторы, предназначенные для использования в резонансных контурах или других цепях, где малые потери и высокая стабильность ёмкости имеют существенное значение; тип 2 — конденсаторы, предназначенные для использования в цепях фильтров, блокировки и развязки или других цепях, где малые потери и высокая стабильность ёмкости не имеют существенного значения; тип 3 — керамические конденсаторы с барьерным слоем, предназначенные для работы в тех же цепях, что и конденсаторы типа 2, но имеющие несколько меньшее значение сопротивления изоляции и большее значение тангенса угла диэлектрических потерь, что ограничивает область применения низкими частотами. Обычно конденсаторы типа 1 считаются высокочастотными, а типов 2 и 3 — низкочастотными. Определенной границы по частоте между конденсаторами типов 1 и 2 не существует. Высокочастотные конденсаторы работают в цепях с частотой до сотен мегагерц, а некоторые типы используют в гигагерцевом диапазоне. Слюдяные и стекломалевые (стеклянные) конденсаторы относятся к конденсаторам типа 1, стеклокерамические могут быть как типа 1, так и типа 2, керамические — трех типов.

Высоковольтные конденсаторы большой и малой реактивной мощности делаются в основном с диэлектриком из керамики и слюды. По назначению они могут быть типов 1 и 2 и так же, как низковольтные конденсаторы, они разделяются на высокочастотные и низкочастотные.

Основным параметром для высоковольтных низкочастотных конденсаторов является удельная энергия, поэтому керамику для них подбирают с большой диэлектрической проницаемостью. Для высокочастотных конденсаторов основным параметром является допустимая реактивная мощность. Она характеризует нагрузочную способность конденсатора при наличии больших напряжений высокой частоты. Для увеличения реактивной мощности, выбирают керамику с малыми потерями, а конструкцию и выводы конденсаторов рассчитывают на возможность прохождения больших токов. Высоковольтные слюдяные конденсаторы делают фольговыми, так как они предназначены для работы при повышенных токовых нагрузках.

Помехоподавляющие конденсаторы с неорганическим керамическим диэлектриком разделяются на опорные и проходные. Их основное назначение — подавление индустриальных и высокочастотных помех, создаваемых промышленными и бытовыми приборами, выпрямительными устройствами и др., а также помех атмосферных и помех, излучаемых различными радиоэлектронными устройствами, т. е. по существу они являются фильтрами нижних частот. К этой группе, исходя из функционального назначения и конструктивного исполнения, условно можно отнести керамические фильтры.

Опорные конденсаторы — это конденсаторы, одним из выводов которых является опорная металлическая пластина с резьбовым креплением.

Проходные конденсаторы делают коаксиальными — один из выводов которых представляет собой токонесущий стержень, по которому протекает полный ток внешней цепи, и некоаксиальными — через выводы которых протекает полный ток внешней цепи.

Проходные керамические конденсаторы имеют конструкцию трубчатого или дискового типа в виде многослойных монолитных шайб.

Если в конденсаторах с целью повышения резонансной частоты принимаются меры к уменьшению собственной индуктивности, то в фильтрах, наоборот, к ёмкости добавляют внешнюю индуктивность (ферритовый сердечник) либо используют индуктивность выводов. При этом в зависимости от соединения ёмкости и индуктивности возможны следующие схемы включения: Г-образные, Т-образные и П-образные.

Силовые конденсаторы используются в установках переменного тока для повышения коэффициента мощности («косинусные конденсаторы»), для продольной компенсации в ЛЭП, в качестве конденсаторов связи и других целей. В установках постоянного тока они работают в схемах с инверторами. Устройство силового конденсатора для повышения коэффициента мощности схематически показано на рис. 2.5.

В герметизированном корпусе 1 расположены плоскопрессованные рулонные секции 2, стянутые в пакет между металлическими щеками 3 с помощью хомутов 4. Между секциями установлены изолирующие прокладки 5 из электрокартона. Изоляция 6 от корпуса выполнена из электрокартона или кабельной бумаги. Секция представляет собой спирально намотанный рулон из лент диэлектрика и алюминиевой фольги и (рис. 2.6), выполняющей роль электродов. В рулонных секциях обе поверхности электродов являются активными, вследствие чего сокращается расход металла на электроды. Отдельные секции (см. рис. 2.5) соединяются перемычками 7 в параллельную, последовательную или смешанную схему в зависимости от рабочего напряжения и требуемой емкости. Конденсатор имеет два вывода 8.

В силовых конденсаторах используется бумажно-масляная изоляция. Чаще всего изоляцию секций выполняют из 6–8 слоев конденсаторной бумаги типа КОН толщиной 10–15 мкм ($\text{tg}\delta = 0,003$). Внутренний объем конденсатора заполнен пропитывающим составом. В качестве пропитки используют минеральные масла ($\epsilon_r = 2,1 - 2,2$) и синтетические полярные жидкости на основе хлордифенила (ХД) ($\epsilon_r = 4,8 - 5,5$). Конденсаторное масло отличается от трансформаторного более тщательной очисткой.

У конденсаторной бумажной изоляции до 30 % объема занимают поры между волокнами и узкие щели между слоями бумаги. Поэтому относительная диэлектрическая проницаемость пропитывающей жидкости сильно влияет на емкость конденсатора. При пропитке хлорированными жидкостями емкость конденсатора в два раза превосходит емкость при пропитке минеральным маслом. Рабочие напряженности в конденсаторах промышленной частоты составляют 12–14 кВ/мм при пропитке минеральными маслами и 15–20 кВ/мм при пропитке хлорированными жидкостями.

Недостатком синтетических жидкостей ХД является их большая чувствительность к загрязнениям. Кроме того, они токсичны и экологически опасны, так как отсутствует их биологическая деградация. Это делает необходимым централизованное уничтожение пробитых конденсаторов по специальной технологии.

Хорошие результаты дает применение комбинированной изоляции, в которой слои бумаги чередуются со слоями неполярной синтетической полимерной пленки. Такой пленкой может быть, например, полипропилен ($\epsilon_r = 2,2-2,3$, $E_{пр} = 180$ кВ/мм, $\text{tg}\delta = 0,0004$, $\rho = 10^{15}-10^{16}$ Ом·м). Для импульсных конденсаторов применяется полиэтилентерефталатная (лавсановая) пленка, а в качестве пропитки – касторовое масло. В комбинированной изоляции

бумага между слоями пленки обеспечивает хорошую пропитку между слоями пленки и отсутствие газовых включений в изоляции.

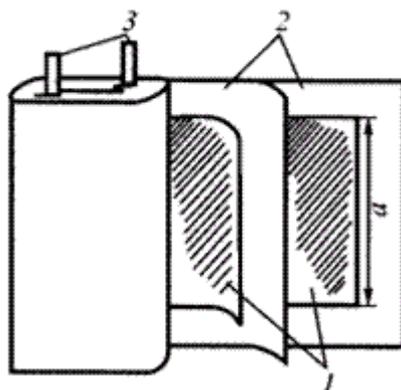


Рисунок 1 Плоскопресованная рулонная секция: 1 – электроды из фольги; 2 – слой бумаги; 3 – выводы

Керамические конденсаторы составляют более половины всех выпускаемых конденсаторов. Диэлектриком в них является керамика с высокой ϵ_r , что позволяет выполнять конденсаторы с меньшими габаритами и весом. Большая часть керамических материалов с высокой ϵ_r имеет в качестве основной составной части диоксид титана TiO_2 . Одна из его модификаций – *рутил* – имеет в направлении главной кристаллографической оси $\epsilon_r = 173$. Низкочастотная керамика имеет $\epsilon_r = 150 - 200$. Имеется полупроводниковая керамика с $\epsilon_r = 500$. Таким образом, керамические материалы по сравнению с полимерными пленками дают огромный выигрыш по значению ϵ_r . Низковольтные и высоковольтные керамические конденсаторы применяются в высокочастотной технике: в измерительных схемах и радиоаппаратуре.

Оксидные конденсаторы используют в качестве диэлектрика тонкую оксидную пленку на поверхности металлов: алюминия, тантала, ниобия. В электролитических конденсаторах сам металл используется как анод, а электролит (корпус) используется в качестве катода.

В *диффузионных конденсаторах* в качестве диэлектрика служит запорный слой на границе *p-n*-перехода в полупроводнике. В *конденсаторах на МДП-структурах (металл–диэлектрик–полупроводник)* в качестве диэлектрика используется слой диоксида кремния, выращенный на поверхности кремниевой пластины. Обкладками служат кремний с одной стороны и тонкая пленка – с другой.

Для изготовления измерительных конденсаторов применяется так называемая *образцовая конденсаторная слюда* марки СО, которая представляет собой мусковит высшего качества и изготавливается в виде пластинок прямоугольной формы. В высокочастотной технике слюдяные конденсаторы применяются в колебательных контурах радиоаппаратуры.

Наибольшие необратимые изменения параметров вызываются длительным воздействием электрической нагрузки, при которой происходят процессы старения, ухудшающие электрическую прочность. Это необходимо учитывать, выбирая значение рабочего напряжения, особенно при длительной эксплуатации конденсаторов. При постоянном напряжении основной причиной старения являются электрохимические процессы, возникающие в диэлектрике под действием постоянного поля и усиливающиеся с повышением температуры и влажности окружающей среды. Степень их влияния на параметры конденсаторов определяется видом диэлектрика и конструктивным исполнением конденсатора. При этом суммарное изменение параметров конденсаторов не превышает значений, гарантируемых на период минимальной наработки, приведенных в справочных данных.

При переменном напряжении и импульсных режимах основной причиной старения являются ионизационные процессы, возникающие внутри диэлектрика или у краёв обкладок, преимущественно в местах газовых включений. Данное явление характерно в основном для высоковольтных конденсаторов. Ионизация разрушает органические диэлектрики в результате бомбардировки их возникающими ионами и электронами, а также за счет агрессивного действия на диэлектрик образовавшихся озона и окислов азота. Для керамических материалов ионизация в закрытой поре вызывает сильный местный разогрев, в результате которого появляются механические напряжения, сопровождающиеся растрескиванием керамики и пробоем по трещине.

Несмотря на то что допускаемое значение напряжённости электрического поля в диэлектрике конденсатора при его испытаниях выбирается с некоторым запасом, эксплуатация под электрической нагрузкой, превышающей номинальное напряжение, резко снижает надёжность конденсаторов.

Превышение допустимой переменной составляющей напряжения может вызвать нарушения теплового равновесия в конденсаторе, приводящего к термическому разрушению диэлектрика. Развитие этого явления обусловлено тем, что активная проводимость диэлектрика возрастёт с повышением температуры.

Наиболее устойчивы к воздействию электрических эксплуатационных нагрузок и стабильны защищенные керамические конденсаторы типа 1

Среди оксидных конденсаторов наиболее стабильны оксидно-полупроводниковые герметизированные конденсаторы. Низкая стабильность электролитических оксидных конденсаторов объясняется наличием в них жидкого или пастообразного электролита, сопротивление которого в большей степени зависит от температуры окружающей среды, чем у оксидно-полупроводниковых конденсаторов. Длительное воздействие электрической нагрузки, особенно при повышенных температурах, вызывает испарение летучих фракций электролита, что ещё больше повышает сопротивление электролита и резко ухудшает температурную и частотную зависимости ёмкости и тангенса угла потерь. Наиболее интенсивно этот процесс протекает у алюминиевых конденсаторов малых габаритов с электролитом на основе диметилформамида.

При длительной эксплуатации под электрической нагрузкой некоторых типов танталовых электролитических конденсаторов возможно снижение ёмкости за счёт пассивации катода, а также возникновение отказов, связанных с разрушением серебряного корпуса и вытеканием вследствие этого электролита. Повышение амплитуды переменной составляющей напряжения ускоряет этот процесс. Новые типы конденсаторов с танталовым корпусом лишены этого недостатка и имеют повышенную стабильность параметров и более высокую долговечность.

Косинусные конденсаторы широко используются в различных областях электроэнергетики для повышения коэффициента мощности. Такие конденсаторы изготавливаются на основе бумажно-масляной и бумажно-пленочной изоляции, пропитанной минеральным (конденсаторным) маслом или синтетическими жидкостями. Расчет таких конденсаторов заключается в определении наиболее оптимальных их размеров путем подбора соответствующего типа диэлектрика и пропитывающей жидкости с целью обеспечить тепловую устойчивость и заданный срок службы.

Расчет конденсаторов обычно проводится в следующей последовательности:

1. Исходя из технического задания, в котором оговариваются назначение конденсатора, значения параметров, выбираем материал изоляции и задаем его толщину между обкладками секции d .

Для изготовления косинусных конденсаторов обычно используется конденсаторная бумага марки КОН-1, КОН-2 или СИЛКОН с плотностью от 0,8 до 1,2 г/см³. В случае бумажно-масляной изоляции толщина бумаги между обкладками берется в

пределах от 40 до 120 мкм, что соответствует 6-10 слоям при толщине одного листа 8-12 мкм.

Для мощных конденсаторов переменного тока вместо емкости в техническом задании может быть указана реактивная мощность Q , в этом случае:

$$C_{\text{ном}} = \frac{Q}{2\pi f U_{\text{раб}}^2} \quad (3)$$

2. Рабочую напряженность поля находим из условия устранения возможности развития ионизации

$$E_{\text{раб}} = E_{\text{нач}} - 3\sigma_{\text{нач}} \quad E_{\text{нач}} = 3,6d^{-0,5} \quad \sigma_{\text{нач}} = (0,1 - 0,15)E_{\text{нач}} \quad (4)$$

Опыт показывает, что для бумажно-масляной изоляции допустимая рабочая напряженность поля может составлять 14-18 кВ/мм, для бумажно-пленочной изоляции - 30-35 кВ/мм, а для пленки - 40-50 кВ/мм.

3. Конденсатор собирается из отдельных секций, соединенных последовательно и параллельно. Количество последовательно соединённых секций найдем:

$$n_{\text{посл}} = \frac{U_{\text{раб}}}{E_{\text{раб}}(n_1\delta_1 + n_2\delta_2)} \quad (5)$$

4. Емкость секции рассчитаем, задаваясь ее размерами (толщиной Δ_c , шириной h и длиной b секции) согласно рис.2. Длина секции b определяется шириной бумажных лент, применяемых при намотке секций. Обычно, во избежания образования морщин при намотке, ширина бумажных лент выбирается не более 280 мм.

$$C_c = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 (b - 2\Delta l) \left(h - \Delta_c + \frac{\pi}{4} \Delta_c k_3 \right) \Delta_c k_3^2}{(n_1\delta_1 + n_2\delta_2)(n_1\delta_1 + n_2\delta_2 + \Delta_{\text{ф}})} \quad (6)$$

здесь ε - диэлектрическая проницаемость, которая в случае бумаги, пропитанной жидким диэлектриком, определяется:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_k}{\varepsilon_n - k_n \frac{\gamma_b}{\gamma_k} (\varepsilon_n - 1)} \quad (7)$$

для комбинированной (бумажно-пленочной изоляции):

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_b \varepsilon_{\text{пл}}}{\varepsilon_b \frac{\delta}{\delta_b} + \varepsilon_{\text{пл}} \frac{\delta_b}{\delta}} \quad (8)$$

где: ε_b , ε_k , $\varepsilon_{\text{пл}}$, ε_n - соответственно диэлектрическая проницаемость бумаги, клетчатки, пленки и пропитывающего состава; γ_b , γ_k - соответственно плотность бумаги и клетчатки; δ , δ_b , $\delta_{\text{пл}}$ - соответственно общая толщина, толщина бумаги и пленки; k_n - коэффициент запрессовки, учитывающий плотность намотки бумаги.

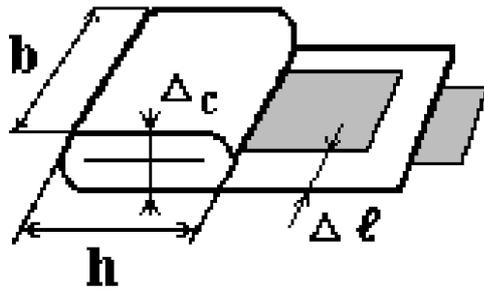


Рисунок 2. Эскиз секции

b - ширина секции; h - высота секции; b - толщина секции; Δl - закраина

5. Число параллельных секций найдем:

$$n_{\text{пар}} = \frac{C_{\text{к}}}{C_{\text{с}}} n_{\text{посл}} \quad (9)$$

6. Компонуем секции в пакет и рассчитываем изоляцию от корпуса.

$$\Delta_k = \frac{U_{\text{исп}}}{E_{\text{пр}}} k_{\text{зап}} \quad (10)$$

где $k_{\text{зап}} = (2-3)$, коэффициент запаса;

$U_{\text{исп}}$ - испытательное напряжение;

$E_{\text{пр}}$ - электрическая прочность изоляции от корпуса. Как правило, найденное значение толщины корпусной изоляции увеличивают исходя из возможного механического повреждения при сборке конденсатора.

Примеры решения задач

Задача 1 Цилиндрический двухслойный конденсатор имеет радиус внутреннего электрода 1,4 см. а наружного - 4,6 см. Относительная диэлектрическая проницаемость внутреннего слоя изоляции равна 6. наружного - 2. Определить необходимые толщины слоев изоляции с учетом равенства максимальных напряженностей электрических полей. К конденсатору приложено напряжение равное 130 кВ.

Решение:

$$E_{\text{max } 1} = \frac{U}{r_0 \cdot \varepsilon_1 \cdot A} \quad E_{\text{max } 2} = \frac{U}{r_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot A}$$

Из условия равенства $E_{\text{max } 1} = E_{\text{max } 2}$ имеем $r_0 \cdot \varepsilon_1 = r_1 \cdot \varepsilon_2$

Откуда искомый радиус поверхности раздела между слоями

$$r_1 = \frac{r_0 \cdot \varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{1,4 \cdot 6}{2} = 4,2 \text{ см}$$

Толщина изоляции первого слоя $d_1 = r_1 - r_0 = 4,2 - 1,4 = 2,8$ см, а второго $d_2 = r_2 - r_1 = 4,6 - 4,2 = 0,4$ см

Тогда

$$E_{max 1} = \frac{130}{1,4 \cdot 6 \cdot \left(\frac{1}{6} \ln \frac{4,2}{1,4} + \frac{1}{2} \ln \frac{4,6}{4,2} \right)} = 6,72 \text{ кВ/см}$$

$$E_{max 1} = E_{max 2} = 6,72 \text{ кВ/см}$$

Ответ: 6,72 кВ/см

Задача 2. Косинусный конденсатор с бумажно-масляной изоляцией имеет реактивную мощность равную 36 квар при рабочем напряжении промышленной частоты 10,5 кВ. Определить емкость конденсатора C , общее количество секций и емкость отдельной секции.

Решение. Емкость конденсатора находим из выражения

$$C = \frac{Q}{2\pi f U_{раб}^2} = \frac{36 \cdot 10^3}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 10,5^2 \cdot 10^6} = 1,04 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

Принимаем толщину бумажно-масляной изоляции в секции конденсатора 60 мкм. Используем бумагу типа КОИ-I с толщиной листа $d_l = 10$ мкм (6 листов в секции), т.е. $d_{онм} = 6 \cdot 10 = 60$ мкм. Для заданного типа конденсатора $E_{раб} = 14$ кВ мм (см. табл. П-20). Тогда рабочее напряжение секции находим по формуле (3)

$$U_{рабс} = E_{раб} \cdot d_{онм} = 14 \cdot 60 \cdot 10^{-3} = 0,84 \text{ кВ} = 840 \text{ В}$$

. Число последовательных секций в конденсаторе

$$N = \frac{U_{раб}}{U_{рабс}} = \frac{10,5}{0,84} = 12,5$$

Принимаем 12 секций.

Емкость секции $C_c = N \cdot C = 12 \cdot 1,04 \cdot 10^{-6} = 12,48 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$

Число параллельных секций

$$M = \frac{C_c}{1,5 \div 2,5} = \frac{12,48}{2,0} \approx 6 \text{ секций}$$

Емкость секции при комбинированном соединении (3-34)

$$C_c = \frac{NC}{M} = \frac{12 \cdot 1,04}{6} = 2,08 \text{ мкФ}$$

Общее число секции $Z = M \cdot N = 6 \cdot 12 = 72$ секции.

Примеры для самостоятельного решения

Пример 1. Сферический конденсатор залит трансформаторным маслом с пробивной прочностью 160 кВ см. Радиус внутреннего электрода 8 см. Определить радиус наружного электрода и максимальное напряжение- которое можно приложить к данному конденсатору.

Пример 2. Определить радиус внутреннего электрода сферического конденсатора и максимальную напряженность поля при пробое трансформаторного масла, если радиус наружного электрода равен 6 см, а пробивное напряжение 90 кВ.

Пример 3. Двухслойный плоский конденсатор с расстоянием между электродами 8 мм заполнен жидкостью ($\epsilon_1 = 2,0$) с электрической прочностью 10 кВ/мм. Пробьется ли конденсатор при напряжении 100 кВ, если на один из электродов положить пластинку толщиной 5 мм из твердого диэлектрика ($\epsilon_2 = 3,5$) с электрической прочностью 20 кВ/мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриевский В.С. Расчет и конструирование электрической изоляции. -М.: Энергоиздат, 1981. - 321 с.
2. Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Б., Пинталь Ю.С. Изоляция установок высокого напряжения. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 368 с.
3. Ренне В.Т., Багалеи Ю.В., Фридберг И.Д. Расчет и конструирование конденсаторов. - Киев; Техника, 1966.326 с.
4. Синявский В.Н. Расчет и конструирование электрокерамических конструкций. - М.; Энергия, 1977. - 192 с.
5. Воробьев А.А., Воробьев Г.А. Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. - М.; Изд-во «Высшая школа», 1966. - 224 с.
6. Чунихин А.А. Электрические аппараты. - М.; Энергоатомиздат, 1988. -719 с.
7. Л.А.Бессонов Теоретические основы электротехники. - М.; Изд-во «Высшая школа», 1973.-750 с.
8. Румшинский Л.З. Элементы теории вероятностей, М.; Изд-во «Наука», 1970. - 255 с.
9. Митропольский А.К. Техника статических вычислений. М.; Изд-во «Наука», 1971. - 576 с.
10. Мартин Ф. Моделирование на вычислительных машинах. М.; Изд-во «Советское радио», 1972.- 288 с.
11. Методы электрических испытаний. Условия окружающей среды при нормализации, кондиционировании и испытании. Гост 6433.1-71 - ГОСТ 6433.4-71.
12. Внутренние перенапряжения и работа загрязненной изоляции. Международная конференция по большим электрическим системам (СИГРЭ-72). Под ред. В.В.Бургсдорфа и А.К.Лоханина. М.; «Энергия», 1975.- 224 с.
13. Александров Г.Н., Иванов В.Л., Кизеветтер В.Б. Электрическая прочность наружной высоковольтной изоляции. Л.; «Энергия», 1969.- 240 с.
14. Абрамов В.Д., Хомяков М.В. Эксплуатация изоляторов высокого напряжения. М., «Энергия», 1976.- 264 с.
15. Костюков Н.С., Минаков Н.В., Князев В.А. и др. Электрические изоляторы. Под ред. Н.С.Костюкова . М.: Энергоатомиздат, 1984.- 296 с.

16. Техника высоких напряжений. Учебник для студентов электротехнических и электроэнергетических специальностей вузов. Под общей ред. Д.В.Разевица. Изд. 2-е, пер. и доп. М., «Энергия», 1976.- 488 с.

17. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения. Пер. с нем. /М.Бйср, В.Бск, К.Меллер, В.Цаспгль; Под ред. В.П.Лариопова. М.: Энергоатомиздат, 1989.- 555 с.

18. Александров Г.Н., Борисов В.В., Каплан Г.С. и др. Проектирование электрических аппаратов. Учебник для вузов /Под ред. Г.Н Александрова. - Л.: Энергоатомиздат, Ленингр.отд., 1985.- 448 с

19. Правила устройства электроустановок / ПУЭ – 7 – Новосибирск: Сиб. унив. из-во, 2010. – 464 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	2
Классификация электрической изоляции	4
Практическая работа № 1 Потери на коронный разряд при передаче электроэнергии	11
Практическая работа № 2 Выбор числа изоляторов в гирлянде	33
Практическая работа № 3 Расчет изоляции кабельных линий	41
Практическая работа № 4 Расчет изоляции проходного изолятора	66
Практическая работа № 5 Изоляция высоковольтных конденсаторов	87
Литература	97
Содержание	99

Методические указания к практическим занятиям

Владислав Викторович Соловьев,

доцент кафедры энергетики ФГБОУ ВПО «АмГУ»

Изоляция электроустановок.

Методические указания к практическим занятиям.

Издательство АмГУ. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 5,81. Заказ 626