

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический

Направление подготовки Электроэнергетика и электротехника

Кафедра Электротехнические комплексы и материалы

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы	
Расчет электротермического конденсатора для электротермических установок	

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г2В	Дашук Илья Павлович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Меркулов Валерий Иванович	К. Т. Н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Трофимова М.Н.	К. Э. Н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Дашковский А.Г.	К. Т. Н., доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Электротехнические комплексы и материалы	Гарганеев Александр Георгиевич	Д. Т. Н., профессор		

Томск 2016 г.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический
Направление подготовки Электроэнергетика и электротехника
Кафедра Электротехнические комплексы и материалы

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5Г2В	Дацук Илья Павлович

Тема работы:

Расчет электротермического конденсатора для электротермических установок	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Номинальное напряжение $U_n = 2 \text{ кВ}$; Реактивная мощность $Q_p = 450000 \text{ Вар}$; Вероятность безотказной работы $P(\phi) = 0,95$; Импульсное перенапряжение $U_{им} = 10 \text{ кВ}$; Среднеквадратичное отклонение $\sigma = 1 \text{ кВ}$; Число перенапряжений в год $N_p = 1000$; Длительность одного перенапряжения $t_1 = 10 \cdot 10^{-6} \text{ с}$; Частота тока $f = 500 \text{ Гц}$; Номинальная емкость $C_n = 17,9 \text{ мкФ}$.
---------------------------------	--

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Введение; Электрический расчет; Тепловой расчет; Расчет срока службы; Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение; Социальная ответственность; Заключение.
Перечень графического материала	Диаграмма Ганта.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Трофимова М.Н.
Социальная ответственность	Дашковский А.Г.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Меркулов Валерий Иванович	к. т. н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г2В	Дашук Илья Павлович		

Реферат

Актуальность данной работы заключается в том, что электротермический конденсатор предназначен для повышения коэффициента мощности электротермических установок частотой от 0,5 до 10 кГц, поэтому он находит широкое применение в электроэнергетике, а также в машиностроении, на металлургических заводах везде, где возникает необходимость использования индукционного нагрева металлов токами высокой частоты. Существующие на данный момент электротермические конденсаторы выполняются с различной изоляцией и на различное напряжение. Постепенно производство электротермических конденсаторов переходит с бумажной на пленочную или бумажно-пленочную изоляцию, что позволяет уменьшить габариты в связи с более высокой электрической прочностью пленки и улучшить экологичность конденсатора.

Структура работы: Был проведен расчет электротермического конденсатора с выступающей и скрытой фольгой, расчет электротермического конденсатора с водяным охлаждением, расчет конденсатора с бумажно-масляной. По результатам расчетов была выбрана наиболее оптимальная конструкция электротермического конденсатора

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2010.

Аннотация

В работе производится расчет электротермического конденсатора на номинальное напряжение 2кВ с различными видами изоляции. По итогам расчетов осуществляется выбор наиболее оптимального варианта конструкции электротермического конденсатора.

Оглавление

Реферат.....	4
Аннотация	4
Введение	6
1. Литературный обзор	7
1.1. Диэлектрические системы конденсатора	8
1.2. Секция и пакет	10
1.3. Конструкции конденсаторов	11
1.4. Конструкции выводов	12
1.5. Техничко – экономические характеристики конденсаторов.....	14
1.6. Выбор материала. Характеристики используемых материалов	17
1.6.1. Конденсаторная бумага	17
1.6.2. Конденсаторное масло	18
1.6.3. Сталь	20
1.6.4. Алюминиевая фольга	20
1.6.5. Высоковольтный фарфор.....	21
1.6.6. Кабельная бумага	21
2. Расчет электротермического конденсатора	22
2.1. Электрический расчет	22
2.1.1. Расчет наружной изоляции.....	22
2.1.2. Расчет внутренней изоляции.....	24
2.1.3. Расчет емкости секций	27
3. Тепловой расчет	33
4. Расчет срока службы	62
Заключение	72

Введение

Электротермический конденсатор предназначен для повышения коэффициента мощности электротермических установок, поэтому он находит широкое применение в электроэнергетике и машиностроении. Электротермические конденсаторы применяются при наличии на производстве индукционных нагревательных печей. С их помощью повышается коэффициент мощности электротермических установок частотой 0,5 – 30кГц.

Существующие на данный момент электротермические конденсаторы выполняются с различной изоляцией и на различное напряжение. Основным недостатком таких конденсаторов является малая мощность. Как показала практика, увеличение мощности имеет определённые негативные черты: прежде всего это увеличение массогабаритных показателей, в связи с этим существенно возрастают денежные и временные затраты связанные с перевозкой, монтажом и наладкой такого оборудования.

В связи с этим возникает вопрос оптимизации конструкции конденсатора.

Для решения поставленной задачи, планируется расчет различных вариантов конструкции конденсатора, а именно:

- С выступающей и скрытой фольгой;
- С бумажно – масляной изоляцией.

1. Литературный обзор

Электрический конденсатор – устройство, широко применяемое в различных областях науки и техники и предназначенное для использования его электрической емкости. Состоит из двух проводников находящихся под разными потенциалами. Эти проводники разделены изоляционным материалом или их композицией (диэлектриком).

Особую группу конденсаторов составляют электротермические конденсаторы. Они предназначены для повышения коэффициента мощности электротермических установок. К таким установкам относятся индукционные печи нагрева. В силу этого обстоятельства, в отличие от других типов конденсаторов, при расчёте нужно учитывать повышенные частоты. За счёт чего могут возникать дополнительные потери, вызывающие нагрев изоляции и нарушение её тепловой устойчивости.

В настоящее время в отечественной и зарубежной промышленности применяются различные типы электротермических конденсаторов на различных классах напряжения и различного значения мощности.

Особенностью электротермических конденсаторов является также горизонтальная компоновка секций в корпусе конденсатора, что обусловлено формой самих секций и наличием выступающей фольги.

Конденсаторы предназначены для работы в закрытых помещениях в следующих условиях:

- интервал температур от 5 до 40 °С в районах с умеренным климатом;
- среднегодовое значение относительной влажности воздуха до 80 % при температуре 15 °С в районах с умеренным климатом;
- атмосферное давление от 84 до 106 кПа (от 630 до 800 мм рт. ст.);
- окружающая среда невзрывоопасная, не содержащая токопроводящей пыли, агрессивных газов и паров в концентрациях, снижающих параметры конденсаторов в недопустимых пределах.

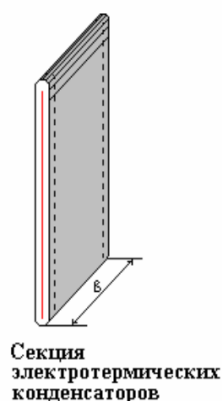


Рисунок 1 - Внешний вид секций электротермического конденсатора
(здесь b – ширина бумажной ленты).

1.1. Диэлектрические системы конденсатора

Электротермический конденсатор, как одна из разновидностей силового конденсатора, состоит из обкладки (две проводящие ленты), которые разделены изоляционным материалом или композицией (диэлектрик). Эта система диэлектрика характеризуется электрической емкостью, представляющей собой по ГОСТ 19880-74 скалярную величину. Электрическая емкость численно равна, абсолютное значение отношения электрического заряда одного проводника к разности потенциалов проводников при условии, что проводники одинаковы, но противоположного по знаку заряда и что все другие проводники бесконечно удалены. С точки зрения физики, емкость характеризует способность системы накапливать электрический заряд, который равен произведению емкости на разность потенциалов, и оба эти параметра определяются свойствами и качеством диэлектрика и конструкцией системы.

Электротермические конденсаторы в отличие от конденсаторов для радиоэлектроники, связи, используются с ограниченным ассортиментом изоляционных материалов, разделяющих обкладки. В качестве изоляционных материалов используют специальную конденсаторную бумагу и синтетические полимерные пленки в форме лент, наматываемых в рулоны,

что позволяет производить машинную намотку секций. Такой слоистый диэлектрик может состоять только из бумаги – бумажный диэлектрик, чередующихся слоев бумаги и пленки – комбинированный бумажно-пленочный диэлектрик или только из пленки – чисто пленочный диэлектрик. Между слоями твердых материалов и в порах бумаги присутствует воздух, для его устранения диэлектрик пропитывается изоляционными пропиточными материалами, имеющими более высокую электрическую прочность. В большинстве случаев – это, пропитывающая материал электроизоляционная жидкость, имеющая ряд преимуществ – хорошее заполнение, отсутствие усадки – перед пропиткой твердеющими (воски и др.) материалами. Чисто пленочный диэлектрик – это, как правило, один слой твердого материала. Бумажный или бумажно-пленочный диэлектрик - может содержать более одного слоя твердого материала.

В качестве обкладок (конструкция с металлизированным диэлектриком) используются диэлектрик образованный нанесением на одну сторону бумаги или пленки алюминиевой фольги, слоя цинка или алюминия. Мягкая обкладка - это двусторонне - металлизированная лента бумаги, у которой обе металлизированные поверхности электрически соединены и электрическое поле в бумаге отсутствует. Мягкая обкладка может иметь различные разновидности в исполнении. При других равных условиях система с фольгой имеет лучшие тепловые характеристики по сравнению с цинком или алюминием, но цинк и алюминий обладают свойством самовосстановления емкости после пробоя. В процессе самовосстановления, дуга при пробое выжигает небольшой участок металлизации, окружающий место пробоя, практически без перерыва в работе конденсатора. Возможно использование комбинированных обкладок, из которых одна является фольгой, другой – металлизированная позволяет улучшить тепловые характеристики, т.к. такая система, сохраняет свойства самовосстановления.

Наиболее распространёнными системами в высоковольтных силовых конденсаторах являются: бумажно-плёночная система, система с плёночными диэлектриками и фольговыми обкладками, которые характеризуются малыми потерями и позволяют создавать конденсаторы с высокими удельными характеристиками в широком диапазоне напряжений и частот. Слои пленки разделяют слоями бумаги, которая в свою очередь является пористой системой и играет роль фитиля, обеспечивает хорошую пропитку бумажно-плёночного диэлектрика. Применение плёночного диэлектрика стало возможным только после разработки способа обработки поверхности пленки, создающего на ней микрокапиллярную систему, которая обеспечивает проникновение пропитывающей жидкости между слоями пленки. Необработанные поверхности, слипаясь, не пропускают пропитывающую жидкость. Рабочие напряженности в бумажном диэлектрике достигают 22 МВ/м, в бумажно – плёночном – 40 МВ/м и в плёночном – более 50 МВ/м.

1.2. Секция и пакет

Конструктивная основа конденсатора представляет секция, это элементарный конденсатор. Различают два типа: секции наматываются на жесткий цилиндр из изоляционного материала, остающийся в ней и после намотки, благодаря чему она сохраняет цилиндрическую форму; секции наматываются на цилиндрическую или плоскую оправку, по окончании которой снимаются с нее, складываются по диаметру и превращаются в плоскопресованные.

Конструктивно секцию выполняют со скрытыми или выступающими обкладками или она может состоять из нескольких подсекций. Конструктивной разновидностью секции со скрытыми обкладками является секция, в которой края одной из обкладок загибаются, при этом они не только скругляются, но могут сдвигаться относительно краев другой,

незагнутой обкладки. В результате этого снижается искажение поля в этой зоне и повышается напряжение возникновения ЧР, что позволяет выбирать более высокие напряженности, по сравнению с секцией с незагнутыми краями обкладки. Отвод тока от секции со скрытыми обкладками осуществляется специальными токоотводами, вкладываемыми в нее при намотке. [1]

В большинстве конденсаторов применяются плоскопрессованные секции, из которых набирается пакет, имеющий форму прямоугольного параллелепипеда. Эта форма позволяет создать наиболее экономичный конденсатор. Секции в пакете соединяются параллельно, последовательно или смешанно. В основном пакет является самостоятельной конструктивной единицей. Иногда в одном конденсаторе используются несколько пакетов, которые образуют единое конструктивное целое, называемое выемной частью. Напряжение подается к схеме через проходные изоляторы (выводы).

1.3. Конструкции конденсаторов

В большинстве случаев конструкция корпуса конденсаторов выполняется в виде прямоугольного параллелепипеда. Если по условиям эксплуатации требуется значительная длина путей утечки внешней изоляции, то применяются (конденсаторы связи, отбора мощности, для делителей напряжения), также применяются ребристые корпуса цилиндрической формы из фарфора на номинальное напряжение от 35 кВ и выше.

Для изготовления прямоугольных корпусов используются как металлы (сталь, латунь, Al), так и различные изоляционные материалы (полипропилен, полиамид и др.). Металлические корпуса применяются для конденсаторов со значительным тепловыделением, изоляционные — для конденсаторов на высокие напряжения, тепловыделение в которых невелико. Чтобы достичь герметизации металлических и прямоугольных корпусов из

изоляционного материала осуществляется сварка и пайка, фарфоровых цилиндрических изделий – с помощью резиновых уплотнений.

Конденсаторы для повышения коэффициента мощности электроустановок переменного тока промышленной частоты выпускаются по ГОСТ 1282-88 и ГОСТ 27390-87. по объему производства (до 70%) они занимают первое место в общем выпуске силовых конденсаторов и относятся к энергосберегающему оборудованию. Условия массового производства требуют максимального сокращения и унификации их типоразмеров.

В зависимости от назначения конденсаторы выполняют нескольких видов: для работы при естественном охлаждении и они изготавливаются для установки на открытом воздухе (наружного исполнения), а также внутри помещений (внутреннего исполнения). Конденсаторы наружного исполнения выпускаются для работы в умеренном климате и тропического исполнения, а также для районов с холодным климатом (исполнение ХЛ). Конструктивно конденсаторы исполнения ХЛ не отличаются от конденсаторов других исполнений, но применяемые в них материалы должны обеспечивать нормальную работу при температурах до $-60\div-65^{\circ}\text{C}$. Главным образом - это относится к пропитывающим жидкостям, которые должны иметь соответствующую температуру застывания. И к характеристикам других материалов, например уплотняющим резинам для конденсаторов в фарфоровых корпусах.

1.4. Конструкции выводов

Пакет, находится в герметично закрытом корпусе. Напряжение к нему подается с помощью специальных проходных фарфоровых изоляторов. В зависимости от конструкции выводов, которые могут быть в виде цилиндрических стержней, плоских шин, коаксиальных цилиндров и др., они могут иметь различные исполнения. Изоляторы герметично соединяются с

корпусом конденсатора. Герметичность соединения достигается металлизацией узких участков фарфора, к которым припаивается металлическая арматура. Затем она герметично припаивается к корпусу. В верхней части изолятора припаян металлический колпачок, который служит для присоединения конденсатора к внешней сети. В случае переходного соединения металл – фарфор герметизация возможна с помощью резины.

В основном недостатком обычно применяемых выводов является их высокая индуктивность. Для то, чтобы снизить ее значение в импульсных конденсаторах используют специальные конструкции выводов. В конструкции на рис. 2 - а собственно выводы I представляют собой медные листы, изогнутые под углом 90° . Они герметично проходят через изоляционную часть 4 крышки Л разделяются изоляционной прокладкой 6 снаружи и бумажно-пропитанной изоляцией 7 внутри конденсатора. Металлическая арматура 5 крышки служит для приварки крышки к стенкам корпуса 8. Шины 3 от секций подводятся к сборным шинам 2, соединенным с выводом 1. Более сложную конструкцию имеет вывод, изображенный на рис. 2- б. Он состоит из цилиндра сложного профиля 5, изготавливаемого обычно из эпоксидной смолы, и вывода. С помощью металлического диска 4 цилиндр 3 герметично сваривается с прямоугольной частью крышки корпуса. На диске 4 имеется специальный выступ 5, к которому приваривается контактное кольцо 2, являющееся вторым полюсом вывода.

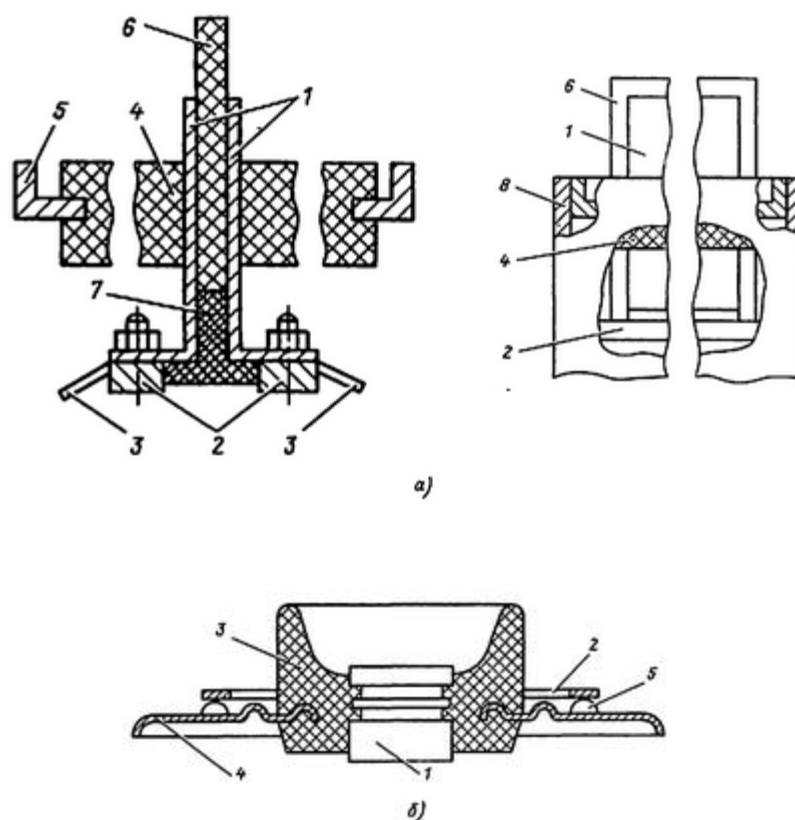


Рисунок 2 – Конструкции мало индуктивных выводов

1.5. Техничко – экономические характеристики конденсаторов

Показателями технического уровня и экономичности конденсаторов являются удельные характеристики, представляющие отношение одного из выходных параметров – емкости C , реактивной мощности Q или запасаемой энергии W – к его полному объему V или массе G . Первая характеристика называется удельной по объему, вторая – удельной по массе.

Конденсаторы связи, отбора мощности, для делителей напряжения и другие в фарфоровых корпусах характеризуются удельной реактивной мощностью, хотя удельные характеристики для них не являются показательными, поскольку габариты их определяются длиной пути утечки внешней изоляции.

Условия эксплуатации конденсаторов

Режим работы внутренней изоляции – диэлектрика, зависит от внешних факторов. Загрязнения – пыль, вещества, образовавшиеся в процессе коррозии металла. Климатические факторы - $T^{\circ}\text{C}$, влажность и давление воздуха, осадки, ветер, солнечная радиация. Механические воздействия - удары, тряска, вибрация. Радиация. Эти факторы влияют на характеристики работы внешней изоляции и состояние конденсатора (вся совокупность климатических факторов, загрязнения). Также они вызывают изменение электрической прочности внешней изоляции, разрушение защитных покрытий и коррозию металлических корпусов. [1]

Климатические исполнения и категории размещения технических изделий регламентируются ГОСТ 15150-69, в соответствии с которым предусмотрены следующие климатические исполнения (в скобках указаны латинские обозначения, принятые в некоторых странах):

- для эксплуатации в макроскопических районах суши. реках и озерах с климатом У (N) – умеренным, ХЛ (F) – холодным, ТВ (TH) – влажным тропическим, ТС (TA) – сухим тропическим, Т (T) – как сухим, так и влажным тропическим, О (U) – общеклиматического исполнения (для всех районов на суше);
- для эксплуатации на морских судах в макроскопических районах с климатом М (M) – умеренно холодным морским, ТМ (MT) – тропическим морским и для судов каботажного плавания или иных судов для плавания только в тропической зоне, ОМ (MU) – для неограниченного района плавания, В (W) – для всех районов на суше и на море.

Для указанных климатических исполнений предусматриваются следующие категории размещения (цифра указывает категорию):

- для работы на открытом воздухе – 1;

- для работы в помещениях, где колебания температуры и влажности воздуха несущественно отличаются от колебаний их на открытом воздухе и имеется сравнительно свободный доступ наружного воздуха, например под навесом или в кожухе комплексного устройства категории 1 (отсутствие прямого воздействия солнечной радиации и атмосферных осадков) – 2;

- для работы в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без искусственного регулирования климатических условий, где колебания температуры и влажности, а так же наличие песка и пыли значительно меньше, чем на открытом воздухе – 3;

- для работы в помещениях с искусственно регулируемым климатом, например в закрытых отапливаемых, охлаждаемых или вентилируемых помещениях – 4;

- для работы в помещениях с повышенной влажностью – 5;

Кроме того, предусматриваются дополнительные категории размещения:

- изделия, хранящиеся в процессе эксплуатации в помещениях категории 4 и работающие как в условиях категории а, так и (кратковременно) в других условиях, в том числе и на открытом воздухе;

- помещения с кондиционированием или частичным кондиционированием воздуха;

- помещения лабораторные, капитальные жилые или другие подобного рода.

Количественно климатические факторы характеризуются нормальными и номинальными, рабочими и предельными значениями. Нормальные климатические факторы – это уточненные для использования в технике, естественно изменяющиеся значения в пределах данной географической зоны. С учетом места размещения конденсатора; номинальные – нормируемые в нормативно – технической документации

значения (естественно изменяющиеся или неизменные), при котором обеспечивается нормальная эксплуатация конденсаторов; рабочие – естественно изменяющиеся или неизменные значения климатических факторов, обеспечивающие сохранение требуемых номинальных параметров и экономически целесообразных сроков службы конденсаторов; предельные – значения климатических факторов, при которых конденсаторы могут (редко и не более 6 часов) оказываться в эксплуатации и должны при этом:

- сохранять работоспособность, но при этом требуемая точность номинальных параметров может не сохраниться;
- после прекращения их действия восстанавливать требуемую точность и номинальные параметры.

Длительность воздействия климатических и механических (вибрации, тряски, удары, линейные нагрузки) факторов, а также методы испытаний устанавливаются в нормативно – технической документации в соответствии с действующими стандартами, а диапазоны изменения окружающей температуры для силовых конденсаторов различных температурных категорий – значениями в публикациях Международной электротехнической комиссии (МЭК). [1]

1.6. Выбор материала. Характеристики используемых материалов

1.6.1. Конденсаторная бумага

Этот вид электротехнической бумаги отличается от других весьма малой толщиной и высокой плотностью. В промышленности выпускают конденсаторную бумагу различного типа, которая различается плотностью, толщиной листа, электрической прочностью, значениями тангенса диэлектрических потерь $\tan \delta$ и характером его зависимости от температуры,

гладкостью, влажностью. Плотность бумаги независимо от температуры от различий в других характеристиках лежат в пределах от 700 до 1400 кг/м³, и обычный ряд составляет 800,1000,1200 и 1300 кг/м³. Толщина листа составляет от 4 до 30 мкм. [4]

Обозначение КОН – определяет назначение и основные качества бумаги, дополнительные качества – бумага получает с добавлением букв. По ГОСТ 1908-82 изготавливаются следующие типы бумаги: обычная (КОН), специальная улучшенного качества (СКОН), с малыми потерями (МКОН), с малыми потерями и высокой электрической прочностью (ЭМКОН) и особо низкими потерями (ОМКОН).

Для проектирования используем бумагу КОН – 1, так как она имеет меньшие значения $\operatorname{tg} \delta$ и диэлектрической проницаемости ϵ .

Таблица 1 – Характеристики конденсаторной бумаги марки КОН 1

Толщина, Мкм	Плотность, γ , кг/м ³	$\operatorname{tg} \delta$		$E_{\text{пр}}$, МВ/м	T_{max} , °C	λ , Вт/м·град	ϵ
10	1000	20°C	80°C	14	100	0,18	3,86
		0,0016	0,0023				

Примечание: Значение $E_{\text{пр}}$ дается для пропитанной бумаги.

1.6.2. Конденсаторное масло

Масло для пропитки силовых конденсаторов выпускается по ГОСТ 5775-85 «Масла конденсаторные. Технические требования»

Конденсаторное масло, по сравнению с кабельным и трансформаторным, очищено лучше (с отбельной землей). Такая глубокая очистка приводит к тому, что конденсаторное масло имеет наиболее высокие электрические свойства среди всех нефтяных масел.

В результате глубокой очистки нефти для получения конденсаторного масла из нее удаляют не только нежелательные примеси, но и естественные антиокислители в виде ароматических углеводородов. Поэтому стабильность конденсаторного масла по сравнению с трансформаторным маслом против окисления значительно хуже. По эти причинам для проектирования силового конденсатора было выбрано именно конденсаторное масло.

Стабильность работы конденсаторов определяется в основном свойствами пропитывающих жидкостей, их стойкость к газовыделению при воздействии частичных разрядов и способностью к газопоглощению. [2] К основным требованиям, которые предъявляются к жидким диэлектрикам как пропитывающим массам, относятся:

- высокая электрическая прочность;
- высокое электрическое сопротивление;
- малая величина диэлектрических потерь, чтобы исключить возможность перегрева;
- стабильность электрических и других показателей в условиях длительной эксплуатации;
- негорючесть и взрывоопасность при смешивании ее паров с воздухом;
- совместимость с материалами, применяемыми в конструкции;
- инертность по отношению к другим диэлектрикам, применяемым в конструкции;
- минимальная вязкость в интервале рабочих температур;
- высокая теплопроводность (для обеспечения отвода тепла);
- низкая стоимость.

Реально обеспечить одновременно все эти требования практически невозможно. Поэтому при подборе жидкого диэлектрика выбирают важнейшие требования, пренебрегая другими.

Таблица 2 – Характеристики конденсаторного масла

ε	$T_{\max}, ^\circ\text{C}$	$\text{tg}\delta$	$\lambda, \text{Вт/м}\cdot\text{град}$
2,2	130	0,0005	0,14

1.6.3. Сталь

Сталь известна как проводниковый материал, обладающий высокой механической прочностью. В электротехнике сталь используется в основном как конструкционный материал для изготовления корпусов, фланцев и различных крепежных изделий [5].

Таблица 3 – Характеристики стали Ст3сп

$\lambda,$ Вт/м·град	Предел прочности, МПа	Твердость, МПа	Плотность $\rho,$ кг/м ³
70	450	131	7850

1.6.4. Алюминиевая фольга

Данный материал применяется как обкладка, проводник. Изготавливается различной толщины. Сильно толстую алюминиевую фольгу использовать нельзя, так как получается большой расход материала. Но и тонкая фольга не применяется, так как при намотке секций может произойти разрыв фольги [5].

Таблица 4 – Характеристики алюминиевой фольги

Теплоемкость, Дж/(кг·°C)	$\lambda,$ Вт/м·град
840	200

1.6.5. Высоковольтный фарфор

Является одним из широко применяемых изоляционных материалов. Широкому применению фарфора способствует то, что изделия обладают высокими диэлектрическими свойствами, технологии изготовления хорошо освоены, сырьем служат распространенные в природе глинистые компоненты, кварцевый песок, пегматиты, полевые шпаты. Отличительной особенностью является то, что технология изготовления достаточно проста, и параметры могут варьироваться в достаточно широких пределах. Высокая пластичность фарфоровых масс позволяет оформлять крупногабаритные изделия сложной конфигурации. Кроме того, фарфоровые изделия малочувствительные при производстве к колебаниям процентных соотношений различных компонентов. Также изделия обжигаются при сравнительно низких температурах и имеют широкий интервал спекания. Основным недостатком является низкая ударная механическая прочность.

Таблица 5 – Характеристики высоковольтного фарфора

$E_{пр}$, МВ/м	T_{max} , °C	$tg\delta$	λ , Вт/м·град	ε
30	500	0,01	1,3	7

1.6.6. Кабельная бумага

Используется для корпусной защиты. Наматывается, таким образом, чтобы защитить внутреннюю часть конструкции от механических повреждений, а также увеличить термостойкость.

Таблица 6 – Характеристики кабельной бумаги КМП

$E_{пр}$, МВ/м	Плотность, кг/м ³	$tg\delta$	λ , Вт/м·град	Толщина, мкм	T_{max} , °C
70	870	0,0027	0,24	120	120

2. Расчет электротермического конденсатора

Исходные данные к проекту:

Номинальное напряжение - $[U_n] = 2 \text{ кВ}$;

Реактивная мощность - $[Q_p] = 45000 \text{ Вар}$;

Вероятность безотказной работы - $[P_\tau] = 0.95$;

Импульсное напряжение - $[U_m] = 10 \text{ кВ}$;

Среднеквадратичное отклонение - $[\sigma] = 1 \text{ кВ}$;

Число перенапряжений в год - $[N_n] = 1000$;

Длительность одного перенапряжения - $[t_1] = 10 \cdot 10^{-6} \text{ с}$;

Частота тока - $[f] = 500 \text{ Гц}$;

Номинальная емкость - $[C_n] = 17.9 \text{ мкФ}$;

2.1. Электрический расчет

2.1.1. Расчет наружной изоляции

Исходя из технического задания (по заданному значению $U_n = 2 \text{ кВ}$) методом экстраполяции по ГОСТ 1516.1-76 находим $U_{схр}$; $U_{мкр}$; $U_{имп}$.

$$U_c = 23 \text{ кВ}; U_d = 18 \text{ кВ};$$

$$U_n = 39 \text{ кВ}; U_n = 2 \text{ кВ}.$$

Выполняем расчет наружной изоляции, принимая за расчётное напряжение.

$$U_0 = 1.1 \cdot U_c = 1.1 \cdot 23 = 25.3 \text{ кВ}.$$

Для определения l используем эмпирические формулы.

$$l_b = \frac{1.1 \cdot U_c}{295} = \frac{1.1 \cdot 23}{295} = 0.086 \text{ м};$$

$$l_{\text{д}} = \frac{U_{\text{с}}}{205} = \frac{23}{205} = 0.112 \text{ м};$$

$$l_{\text{и}} = \frac{U_{\text{и}}}{500} = \frac{39}{500} = 0.078 \text{ м}.$$

Из трех найденных значений выбираем наибольшее, т.е. $l_{\text{д}} = 0.112 \text{ м}$.

Находим длину масляной части изолятора.

$$l_{\text{м}} = \frac{U_0}{800} = \frac{25.3}{800} = 0.032 \text{ м}.$$

Рассчитываем количество ребер и их размеры.

$$n_{\text{р}} = 1.5 + 0.65 \cdot U_{\text{н}} = 1.5 + 0.65 \cdot 2 = 1.63;$$

$$t_{\text{р}} = \frac{l_{\text{д}}}{n_{\text{р}}} = \frac{0.112}{1.63} = 0.069;$$

$$a_{\text{р}} = 0.7 \cdot t_{\text{р}} = 0.7 \cdot 0.069 = 0.048;$$

Принимаем:

$$n_{\text{р}} = 2; \quad t_{\text{р}} = 0.07; \quad n_{\text{п}} = 2; \quad a_{\text{р}} = 0.05; \quad a_{\text{пл}} = 0.02.$$

По расчетным данным выбираем изолятор ПНТ 10-250.

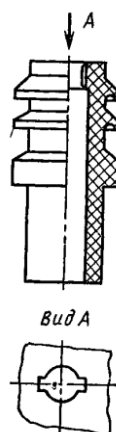


Рисунок 3 – Изолятор ПНТ 10-250

Производим проверку изолятора из условия перекрытия под дождем.

$$U_{\text{др}} = (124 \cdot l_{\text{д}}^{0.77} + 4.2 \cdot n_{\text{р}} \cdot t_{\text{р}}^{0.6} \cdot \frac{a_{\text{р}}}{a_{\text{р1}}}) = U_{\text{д}} = 18 \text{ кВ};$$

$$(124 \cdot 0.112^{0.77} + 4.2 \cdot 2 \cdot 0.07^{0.6} \cdot \frac{0.05}{0.02}) = 23.66 \text{ кВ};$$

Из сравнения видим, что найденное значение превышает принятое, то есть выбор изолятора из условия перекрытия произведен правильно.

2.1.2. Расчет внутренней изоляции

Из справочника [8] находим электрическую прочность бумажно-масляной изоляции и электрическую прочность полипропиленовой пленки. Для предварительных расчётов примем среднее значение электрической прочности.

$$E_{\text{пр1}} = 14 \cdot 10^6 \frac{\text{В}}{\text{м}}; E_{\text{пр2}} = 50 \cdot 10^6 \frac{\text{В}}{\text{м}}; E_{\text{пр}} = 32 \cdot 10^6 \frac{\text{В}}{\text{м}};$$

Определим значение допустимой рабочей напряженности, принимаем значение коэффициента запаса $k_1 = 1.1 - 1.6$, коэффициента разброса электрической прочности $k_2 = 1.2 - 2.2$ и коэффициента изменения длительной электрической прочности $k_3 = 1.3 - 2.5$. Значения коэффициентов берут тем больше, чем больше частота тока.

$$E_{\text{раб.д}} = \frac{E_{\text{пр}}}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3} = \frac{32 \cdot 10^6}{1.1 \cdot 1.2 \cdot 1.3} = 1.865 \cdot 10^7 \frac{\text{В}}{\text{м}};$$

Принимаем $k_1 = 1.1$; $k_2 = 1.2$; $k_3 = 1.3$.

Изоляцию между обкладками выполним из 2 слоев бумаги и 2 слоев полипропиленовой пленки толщиной 10 мкм.

$$n_1=2; n_2=2;$$

$$\xi_1 = 6.6; \xi_2 = 2.25;$$

$$\delta_1 = 10 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \delta_2 = 10 \cdot 10^{-6} \text{ м};$$

$$d = (n_1 \cdot \delta_1 + n_2 \cdot \delta_2) = 2 \cdot 10 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ м}.$$

Конденсатор собирается из отдельных секций, соединенных последовательно и параллельно. Количество последовательно соединенных секций.

$$n_{\text{пос}} = \frac{U_{\text{н}} \cdot 1000}{E_{\text{раб.д}} \cdot d} = \frac{2 \cdot 1000}{1.865 \cdot 10^7 \cdot 4 \cdot 10^{-5}} = 2.681; \text{ Примем } n_{\text{пос}} = 3.$$

Определим значения рабочей напряженности электрического поля и напряжения, приходящегося на одну секцию.

$$E_{\text{раб.с}} = \frac{U_{\text{н}} \cdot 1000}{n_{\text{пос}} \cdot (n_1 \cdot \delta_1 + n_2 \cdot \delta_2)} = \frac{2 \cdot 1000}{3 \cdot (2 \cdot 10 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 10 \cdot 10^{-6})} = 1.667 \cdot 10^7 \frac{\text{В}}{\text{м}};$$

$$U_{\text{с}} = E_{\text{раб.с}} \cdot (n_1 \cdot \delta_1 + n_2 \cdot \delta_2) = 1.667 \cdot 10^7 \cdot (2 \cdot 10 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 10 \cdot 10^{-6}) = 666.67 \text{ В}.$$

Произведем проверку на электрическую прочность каждого материала, исходя из последовательной схемы замещения слоев изоляции.

$$d_1 = n_1 \cdot \delta_1 = 2 \cdot 10 \cdot 10^{-6} \text{ м}; d_2 = n_2 \cdot \delta_2 = 2 \cdot 10 \cdot 10^{-6} \text{ м};$$

$$U_2 = \frac{U_{\text{с}} \cdot \varepsilon_1}{\delta_1 \cdot \left(\frac{\varepsilon_1}{\delta_1} + \frac{\varepsilon_2}{\delta_2} \right)} = \frac{666.67 \cdot 10^7 \cdot 6.6}{2 \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{6.6}{2 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} + \frac{2.25}{2 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} \right)} = 497.175 \text{ В};$$

$$U_1 = U_{\text{с}} - U_2 = 666.67 - 497.175 = 169.492 \text{ В};$$

$$E_1 = \frac{U_1}{n_1 \cdot \delta_1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot (n_2 \cdot \delta_2)} = \frac{169.492}{2 \cdot 10 \cdot 10^{-6} + \frac{6.6}{2.25} \cdot (2 \cdot 10 \cdot 10^{-6})} = 2.155 \cdot 10^6 \frac{\text{В}}{\text{м}};$$

$$E_2 = \frac{U_2}{n_2 \cdot \delta_2 + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \cdot (n_1 \cdot \delta_1)} = \frac{497.175}{2 \cdot 10 \cdot 10^{-6} + \frac{2.25}{6.6} \cdot (2 \cdot 10 \cdot 10^{-6})} = 1.854 \cdot 10^7 \frac{\text{В}}{\text{м}};$$

$$E_{\text{пр1}} = 1.4 \cdot 10^7 \frac{\text{В}}{\text{м}} \succ E_1 = 2.155 \cdot 10^6 \frac{\text{В}}{\text{м}};$$

$$E_{\text{пр2}} = 5 \cdot 10^7 \frac{\text{В}}{\text{м}} \succ E_2 = 1.854 \cdot 10^7 \frac{\text{В}}{\text{м}};$$

Из проведенных расчетов видно, что напряженности электрического поля в бумажно-масляной и пленочной изоляции не превышают значения их электрической прочности.

Найдем испытательное напряжение секции и длину закраины

$$U_{\text{исп.с}} = 2 \cdot \frac{U_{\text{н}} \cdot 1000}{n_{\text{пос}}} = 2 \cdot \frac{2 \cdot 1000}{3} = 1.467 \cdot 10^3 \text{ В};$$

$$k_{\text{зак}} = 1.5 \frac{\text{мм}}{\text{кВ}} \text{ — коэффициент закраины};$$

$$l_{\text{тех}} = 5 \text{ мм} \text{ — допуск на технологическое смещение фольги};$$

$$\Delta l = k_{\text{зак}} \cdot U_{\text{исп.с}} + l_{\text{тех}} = 1.5 \cdot 1.467 \cdot 10^3 + 5 = 2.205 \cdot 10^3 \text{ мм};$$

$$\text{Примем: } \Delta l = 2.2 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

Найдем толщину изоляции между секциями от корпуса

$$\Delta_{\text{изс}} = \frac{2 \cdot U_{\text{исп.с}}}{E_{\text{раб.с}}} \cdot k_1 = \frac{2 \cdot 1.467 \cdot 10^3}{1.667 \cdot 10^7} \cdot 1.1 = 1.936 \cdot 10^{-4} \text{ м. Примем } \Delta_{\text{изс}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м};$$

$$\Delta_{\text{изк}} = \frac{U_{\text{н}} \cdot 1000}{E_{\text{пр1}}} \cdot k_1 \cdot k_{\text{н}} = \frac{2 \cdot 1000}{1.4 \cdot 10^7} \cdot 1.1 \cdot 1.3 = 2.043 \cdot 10^{-4} \text{ м};$$

$$\text{Примем } \Delta_{\text{изс}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м};$$

Изоляцию от корпуса выполняем из кабельной бумаги толщиной 20 мкм, т.к. изоляция от корпуса дополнительно несет механическую нагрузку, предотвращая задиры секции при сборке конденсатора.

2.1.3. Расчет емкости секций

Выполним расчет диэлектрической проницаемости бумажно-плёночной изоляции, определив из справочной литературы [2] значения отдельных компонентов (бумаги, пропитывающей жидкости, пленки).

$\varepsilon_k = 6.6$ – диэлектрическая проницаемость клетчатки;

$\varepsilon_{ж} = 2.2$ – диэлектрическая проницаемость конденсаторного масла;

$\varepsilon_{п} = 2.25$ – диэлектрическая проницаемость полипропиленовой пленки;

$$k = 1;$$

$\gamma_{б} = 1000$ – плотность конденсаторной бумаги КОН–1;

$\gamma_k = 1550$ – плотность клетчатки;

$\gamma_{п} = 900$ – плотность полипропиленовой пленки;

$$\chi = 1 - \frac{\gamma_{б}}{\gamma_k} = \frac{1000}{1550} = 0.355;$$

$$\varepsilon_{бм} = \frac{\varepsilon_{ж}}{1 + \frac{\gamma_{б} \cdot k \left[\left(\frac{\varepsilon_{ж}}{\varepsilon_k} \right) - 1 \right]}{\gamma_k}} = \frac{2.2}{1 + \frac{1000 \cdot 1 \left[\left(\frac{2.2}{6.6} \right) - 1 \right]}{1550}} = 3.86 -$$

диэлектрическая проницаемость бумажно – масляной изоляции;

$$\varepsilon_{бп} = \frac{\varepsilon_{бм}}{1 + \frac{\gamma_{п} \cdot k \left[\left(\frac{\varepsilon_{бм}}{\varepsilon_{п}} \right) - 1 \right]}{\gamma_k}} = \frac{3.86}{1 + \frac{900 \cdot 1 \left[\left(\frac{3.86}{2.25} \right) - 1 \right]}{1550}} = 2.727 -$$

диэлектрическая проницаемость бумажно – плёночной изоляции.

Уточним значение диэлектрической проницаемости с учетом объемных долей компонентов.

$$\Theta_1 = \frac{n_1 \cdot \delta_1}{n_1 \cdot \delta_1 + n_2 \cdot \delta_2} \cdot (1 - \chi) = \frac{2 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} \cdot (1 - 0.355) = 0.323 -$$

объёмная доля занимаемая клетчаткой;

$$\Theta_3 = \chi \cdot \frac{n_1 \cdot \delta_1}{n_1 \cdot \delta_1 + n_2 \cdot \delta_2} = 0.355 \cdot \frac{2 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = 0.177 -$$

объёмная доля занимаемая воздухом;

$$\Theta_2 = 1 - (\Theta_1 + \Theta_3) = 1 - (0.323 + 0.177) = 0.5 -$$

объёмная доля занимаемая пленкой;

$$\varepsilon_{\text{бп}} = \frac{1}{\frac{\Theta_1}{\varepsilon_{\text{к}}} + \frac{\Theta_2}{\varepsilon_{\text{п}}} + \frac{\Theta_3}{\varepsilon_{\text{ж}}}} = \frac{1}{\frac{0.323}{6.6} + \frac{0.5}{2.25} + \frac{0.177}{2.2}} = 2.843 -$$

диэлектрическая проницаемость бумажно – плёночной изоляции,

Примем $\varepsilon_{\text{бп}} = 2.84$.

В соответствии с прототипом [9] заданного конденсатора зададим размеры корпуса (высоту Н, ширину В и длину L, зазор от крышки Δ), толщину стенок и выберем горизонтальную компоновку с выступающей фольгой.

$$H = 0.38 \text{ м}; V = 0.12 \text{ м}; L = 0.39 \text{ м}; \Delta = 0.06 \text{ м}; \Delta_{\text{мет}} = 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \\ \Delta_{\text{с}} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

- Для секций со скрытой фольгой

$$b_{\text{сск}} = H - 2 \cdot \Delta_{\text{мет}} - 2 \cdot \Delta_{\text{изк}} - \Delta = 0.38 - 2 \cdot 0.5 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 2 \cdot 10^{-4} - 0.06 = 0.319 \text{ м};$$

$$h_{\text{сск}} = V - 2 \cdot \Delta_{\text{мет}} - 2 \cdot \Delta_{\text{изк}} = 0.12 - 2 \cdot 0.5 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 0.119 \text{ м};$$

Примем $h_{\text{сск}} = 0.12 \text{ м}$; $b_{\text{сск}} = 0.32$;

- Для секций с выступающей фольгой

$$b_{\text{св}} = B - 2 \cdot \Delta_{\text{мет}} - 2 \cdot \Delta_{\text{изк}} = 0.38 - 2 \cdot 0.5 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 0.119 \text{ м};$$

$$h_{\text{св}} = H - \Delta - 2 \cdot \Delta_{\text{мет}} - 2 \cdot \Delta_{\text{изк}} = 0.38 - 0.06 - 2 \cdot 0.5 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 0.319 \text{ м};$$

$$\text{Примем } h_{\text{св}} = 0.32 \text{ м}; b_{\text{св}} = 0.12;$$

Рассчитаем емкость секции, и, исходя из заданной емкости конденсатора, определим число параллельных секций. В данном случае для корректности нужно подбирать размеры секции так, чтобы емкость в обоих случаях была примерно одинаковой.

$$k_3 = 0.9; \Delta_{\phi} = 12 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{12} \frac{\Phi}{\text{м}};$$

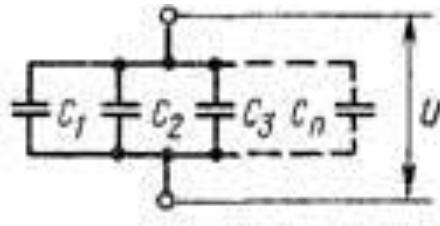


Рисунок 4 – Схема параллельных секций в конденсаторе

Путём подбора значения $\Delta_{\text{сск}}$ сравняем величины $C_{\text{с1}}$ и $C_{\text{с2}}$.

Для секций со скрытой фольгой

$$\Delta_{\text{сск}} = 0.01133;$$

$$C_{\text{сск1}} = \frac{\varepsilon_{\text{бп}} \cdot \varepsilon_0 \cdot (b_{\text{сск}} - 2 \cdot \Delta l) \cdot (h_{\text{сск}} - \Delta c + \frac{\pi}{4} \cdot \Delta_{\text{сск}} \cdot k_3) \cdot \Delta_{\text{сск}} \cdot k_3^2}{d \cdot (d + \Delta_{\phi})} =$$

$$\frac{2.84 \cdot 8.85 \cdot 10^{12} \cdot (0.32 - 2 \cdot 2.2 \cdot 10^{-3}) \cdot (0.12 - 0.01 + \frac{3.14}{4} \cdot 0.01133 \cdot 0.9) \cdot 0.01133 \cdot 0.9^2}{4 \cdot 10^{-5} \cdot (4 \cdot 10^{-5} + 12 \cdot 10^{-6})} =$$

$$4.13 \cdot 10^{-6} \Phi;$$

Число параллельных секций

$$n_{\text{пар}} = \frac{C_{\kappa} \cdot n_{\text{пос}}}{C_{\text{сск1}}} = \frac{1.79 \cdot 10^{-5} \cdot 3}{4.13 \cdot 10^{-6}} = 13.002; \text{ Примем } n_{\text{пар}} = 13;$$

$$C_{\text{сск2}} = C_{\kappa} \cdot \frac{n_{\text{пос}}}{n_{\text{пар1}}} = \frac{3}{13} = 4.131 \cdot 10^{-6} \text{ Ф};$$

Скомпонуем секции в пакет, рассчитаем его размеры и габариты конденсатора.

Для секций с выступающей фольгой

$$\Delta_{\text{св}} = 0.01153;$$

$$C_{\text{св1}} = \frac{\varepsilon_{\text{бп}} \cdot \varepsilon_0 \cdot (b_{\text{св}} - 2 \cdot \Delta l) \cdot (h_{\text{св}} - \Delta_{\text{с}} + \frac{\pi}{4} \cdot \Delta_{\text{с}} \cdot k_3) \cdot \Delta_{\text{с}} \cdot k_3^2}{d \cdot (d + \Delta_{\phi})} =$$

$$\frac{2.84 \cdot 8.85 \cdot 10^{12} \cdot (0.12 - 2 \cdot 2.2 \cdot 10^{-3}) \cdot (0.32 - 0.01 + \frac{3.14}{4} \cdot 0.01133 \cdot 0.9) \cdot 0.01133 \cdot 0.9^2}{4 \cdot 10^{-5} \cdot (4 \cdot 10^{-5} + 12 \cdot 10^{-6})} =$$

$$4.131 \cdot 10^{-6} \text{ Ф};$$

Число параллельных секций

$$n_{\text{пар2}} = \frac{C_{\kappa} \cdot n_{\text{пос}}}{C_{\text{св1}}} = \frac{1.79 \cdot 10^{-5} \cdot 3}{4.131 \cdot 10^{-6}} = 12.99; \text{ Примем } n_{\text{пар2}} = 13;$$

$$C_{\text{св2}} = C_{\kappa} \cdot \frac{n_{\text{пос}}}{n_{\text{пар2}}} = 1.79 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{3}{13} = 4.131 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Скомпонуем секции в пакет, рассчитываем его размеры и габариты конденсатора.

- Для секций со скрытой фольгой

Размеры пакета

$$h_{\text{пск}} = h_{\text{сск}} + 2 \cdot \Delta_{\text{изк}} = 0.12 + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 0.12 \text{ м};$$

$$b_{\text{пск}} = b_{\text{сск}} + 2 \cdot \Delta_{\text{изк}} = 0.32 + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 0.32 \text{ м};$$

$$l_{\text{пск}} = n_{\text{пар1}} \cdot n_{\text{пос}} \cdot \Delta_{\text{сск}} + n_{\text{пар1}} \cdot n_{\text{пос}} \cdot \Delta_{\text{изс}} + 2 \cdot \Delta_{\text{изк}} = \\ 13 \cdot 3 \cdot 0.011 + 13 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 0.437 \text{ м};$$

Размеры корпуса

$$H_{\text{кск}} = b_{\text{пск}} + \Delta + 2 \cdot \Delta_{\text{мет}} = 0.32 + 0.06 + 2 \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 0.381 \text{ м};$$

$$B_{\text{кск}} = h_{\text{пск}} + 2 \cdot \Delta_{\text{мет}} = 0.12 + 2 \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 0.121 \text{ м};$$

$$L_{\text{кск}} = l_{\text{пск}} + 2 \cdot \Delta_{\text{мет}} = 0.437 + 2 \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 0.438 \text{ м};$$

- Для секций с выступающей фольгой

Размеры пакета

$$h_{\text{пв}} = h_{\text{св}} + 2 \cdot \Delta_{\text{изк}} = 0.32 + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 0.32 \text{ м};$$

$$b_{\text{пв}} = b_{\text{св}} + 2 \cdot \Delta_{\text{изк}} = 0.12 + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 0.12 \text{ м};$$

$$l_{\text{пв}} = n_{\text{пар2}} \cdot n_{\text{пос}} \cdot \Delta_{\text{св}} + n_{\text{пар2}} \cdot n_{\text{пос}} \cdot \Delta_{\text{изс}} + 2 \cdot \Delta_{\text{изк}} = \\ 13 \cdot 3 \cdot 0.012 + 13 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 0.476 \text{ м};$$

Размеры корпуса

$$H_{\text{кв}} = h_{\text{св}} + \Delta + 2 \cdot \Delta_{\text{мет}} = 0.32 + 0.06 + 2 \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 0.381 \text{ м};$$

$$B_{\text{кв}} = b_{\text{св}} + 2 \cdot \Delta_{\text{мет}} = 0.12 + 2 \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 0.121 \text{ м};$$

$$L_{\text{кв}} = l_{\text{пв}} + 2 \cdot \Delta_{\text{мет}} = 0.476 + 2 \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 0.477 \text{ м};$$

Таблица 6 – Габариты электротермического конденсатора с различными видами изоляции

Номер варианта	Высота, м	Ширина, м	Длина, м
1. Комбинированная бумажно-пленочная изоляция с выступающей фольгой			
а) бумажно- пленочная изоляция с выступающей фольгой	$H = 0,381$	$B = 0,121$	$L = 0,438$
б) то же, но при уменьшении толщины и числа слоев бумаги пленки в изоляции между обкладками	$H = 0,381$	$B = 0,121$	$L = 0,496$
2. Комбинированная бумажно-пленочная изоляция со скрытой фольгой	$H = 0,381$	$B = 0,121$	$L = 0,477$
3. Бумажно-масляная изоляция	$H = 0,381$	$B = 0,121$	$L = 0,931$

Кроме рассматриваемого в работе варианта (комбинированная бумажно-пленочная изоляция с выступающей фольгой) рассмотрим другие варианты:

б) уменьшение числа слоев пленки, учитывая, что имеется запас по электрической прочности и бумаги не подходит, т.к. габаритные размеры увеличиваются.

в) использование полярной лавсановой пленки для увеличения емкости секции, за счет чего изменится число параллельных секций и соответственно габаритные размеры. Габаритные размеры уменьшились, но при дальнейшем расчете вышло, что срок службы такого конденсатора значительно уменьшается по сравнению с основным вариантом.

Вывод: выбранный ранее вариант – конденсатор с комбинированной бумажно-пленочной изоляцией в исполнении с выступающей фольгой является наиболее оптимальным.

3. Тепловой расчет

Для проведения теплового расчета конденсатора необходимо знать температурную зависимость $\operatorname{tg}\delta$ для выбранной комбинированной изоляции. В случае приближенных расчетов можно принять, что эта зависимость имеет экспоненциальный характер.

Чтобы построить такую зависимость, зададим два значения $\operatorname{tg}\delta$ отдельных компонентов при разных температурах.

Произведем расчет диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь для комбинированной изоляции при температуре 20°C .

$\varepsilon_{\kappa} = 6.6$ – диэлектрическая проницаемость клетчатки;

$\varepsilon_{\text{ж}} = 2.2$ – диэлектрическая проницаемость пропитывающей жидкости;

$\varepsilon_{\text{п}} = 2.25$ – диэлектрическая проницаемость полипропиленовой пленки;

$$\chi = 1 - \frac{\gamma_{\text{б}}}{\gamma_{\kappa}} = \frac{1000}{1550} = 0.355;$$

$$k = 1;$$

$\gamma_{\text{б}} = 1000$ – плотность конденсаторной бумаги КОН–1;

$\gamma_{\kappa} = 1550$ – плотность клетчатки;

$\gamma_{\text{п}} = 900$ – плотность полипропиленовой пленки;

$$\chi = 1 - \frac{\gamma_{\text{б}}}{\gamma_{\kappa}} = \frac{1000}{1550} = 0.355;$$

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{бм}} = \frac{\operatorname{tg} \epsilon_{\text{к}}}{1 + \frac{\epsilon_{\text{к}} \left[\left(\frac{\gamma_{\text{к}} - k \cdot \gamma_{\text{б}}}{k \cdot \gamma_{\text{б}}} \right) \right]}{\epsilon_{\text{ж}}}} + \frac{\operatorname{tg} \epsilon_{\text{ж}}}{1 + \frac{\epsilon_{\text{ж}} \left[\left(\frac{k \cdot \gamma_{\text{б}}}{\gamma_{\text{к}} - k \cdot \gamma_{\text{б}}} \right) \right]}{\epsilon_{\text{к}}}} = 2.198 \cdot 10^{-3} -$$

тангенс угла диэлектрических потерь бумажно – пропитанной изоляции;

$$\epsilon_{\text{бм}} = \frac{\epsilon_{\text{ж}}}{1 + \frac{\gamma_{\text{б}} \cdot k \left[\left(\frac{\epsilon_{\text{ж}}}{\epsilon_{\text{к}}} \right) - 1 \right]}{\gamma_{\text{к}}}} = \frac{2.2}{1 + \frac{1000 \cdot 1 \left[\left(\frac{2.2}{6.6} \right) - 1 \right]}{1550}} = 3.86 -$$

диэлектрическая проницаемость бумажно – пропитанной изоляции;

$$\epsilon_{\text{бп}} = \frac{\epsilon_{\text{бм}}}{1 + \frac{\gamma_{\text{п}} \cdot k \left[\left(\frac{\epsilon_{\text{бм}}}{\epsilon_{\text{п}}} \right) - 1 \right]}{\gamma_{\text{к}}}} = \frac{3.86}{1 + \frac{900 \cdot 1 \left[\left(\frac{3.86}{2.25} \right) - 1 \right]}{1550}} = 2.727 -$$

диэлектрическая проницаемость бумажно – пленочной изоляции;

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{бп}} = \frac{\operatorname{tg} \delta_{\text{бм}}}{1 + \frac{\epsilon_{\text{бм}} \left[\left(\frac{\gamma_{\text{к}} - k \cdot \gamma_{\text{п}}}{k \cdot \gamma_{\text{п}}} \right) \right]}{\epsilon_{\text{п}}}} + \frac{\operatorname{tg} \delta_{\text{п}}}{1 + \frac{\epsilon_{\text{п}} \left[\left(\frac{k \cdot \gamma_{\text{п}}}{\gamma_{\text{к}} - k \cdot \gamma_{\text{п}}} \right) \right]}{\epsilon_{\text{бм}}}} = 1.148 \cdot 10^{-3} -$$

тангенс угла диэлектрических потерь бумажно – пропитанной изоляции;

Произведем расчет диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь для комбинированной изоляции при температуре 80°C.

$\operatorname{tg} \delta_{\text{бп}} = 0.0005$ – тангенс угла диэлектрических потерь полипропиленовой плёнки;

$\operatorname{tg} \delta_{\text{ж}} = 0.005$ – тангенс угла диэлектрических потерь пропитывающей жидкости;

$\operatorname{tg} \delta_{\text{к}} = 0.007$ – тангенс угла диэлектрических потерь клетчатки;

$$\chi = 1 - \frac{\gamma_{\delta}}{\gamma_{\kappa}} = \frac{1000}{1550} = 0.355;$$

$$\operatorname{tg} \delta_{\delta\text{м}} = \frac{\operatorname{tg} \delta_{\delta\text{к}}}{1 + \frac{\varepsilon_{\kappa} \left[\left(\frac{\gamma_{\kappa} - k \cdot \gamma_{\delta}}{k \cdot \gamma_{\delta}} \right) \right]}{\varepsilon_{\text{ж}}}} + \frac{\operatorname{tg} \delta_{\text{ж}}}{1 + \frac{\varepsilon_{\text{ж}} \left[\left(\frac{k \cdot \gamma_{\delta}}{\gamma_{\kappa} - k \cdot \gamma_{\delta}} \right) \right]}{\varepsilon_{\kappa}}} = 5.755 \cdot 10^{-3} -$$

тангенс угла диэлектрических потерь бумажно – пропитанной изоляции;

$$\varepsilon_{\delta\text{м}} = \frac{\varepsilon_{\text{ж}}}{1 + \frac{\gamma_{\delta} \cdot k \left[\left(\frac{\varepsilon_{\text{ж}}}{\varepsilon_{\kappa}} \right) - 1 \right]}{\gamma_{\kappa}}} = \frac{2.2}{1 + \frac{1000 \cdot 1 \left[\left(\frac{2.2}{6.6} \right) - 1 \right]}{1550}} = 3.86 -$$

диэлектрическая проницаемость бумажно – пропитанной изоляции;

$$\varepsilon_{\delta\text{п}} = \frac{\varepsilon_{\delta\text{м}}}{1 + \frac{\gamma_{\text{п}} \cdot k \left[\left(\frac{\varepsilon_{\delta\text{м}}}{\varepsilon_{\text{п}}} \right) - 1 \right]}{\gamma_{\kappa}}} = \frac{3.86}{1 + \frac{900 \cdot 1 \left[\left(\frac{3.86}{2.25} \right) - 1 \right]}{1550}} = 2.727 -$$

диэлектрическая проницаемость бумажно – пленочной изоляции;

$$\operatorname{tg} \delta_{\delta\text{п}} = \frac{\operatorname{tg} \delta_{\delta\text{м}}}{1 + \frac{\varepsilon_{\delta\text{м}} \cdot \left[\left(\frac{\gamma_{\kappa} - k \cdot \gamma_{\text{п}}}{k \cdot \gamma_{\text{п}}} \right) \right]}{\varepsilon_{\text{п}}}} + \frac{\operatorname{tg} \delta_{\text{п}}}{1 + \frac{\varepsilon_{\text{п}} \cdot \left[\left(\frac{k \cdot \gamma_{\text{п}}}{\gamma_{\kappa} - k \cdot \gamma_{\text{п}}} \right) \right]}{\varepsilon_{\delta\text{м}}}} = 2.847 \cdot 10^{-3} -$$

тангенс угла диэлектрических потерь бумажно – пленочной изоляции;

Произведем расчет диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь для кабельной бумаги при температуре 20 °С.

$\varepsilon_{\text{каб}} = 3.2$ – диэлектрическая проницаемость кабельной бумаги;

$\gamma_{\text{каб}} = 870$ – плотность кабельной бумаги;

$\operatorname{tg} \delta_{\text{каб}} = 0.0027$ – тангенс угла диэлектрических потерь
кабельной бумаги;

$$\varepsilon_{\text{бкаб}} = \frac{\varepsilon_{\text{бм}}}{1 + \frac{\gamma_{\text{п}} \cdot k \left[\left(\frac{\varepsilon_{\text{бм}}}{\varepsilon_{\text{каб}}} \right) - 1 \right]}{\gamma_{\text{к}}}} = \frac{3.86}{1 + \frac{900 \cdot 1 \left[\left(\frac{3.86}{3.2} \right) - 1 \right]}{1550}} = 3.447 \quad -$$

диэлектрическая проницаемость бумажно – пропитанной изоляции
(кабельная бумага);

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{каб}} = \frac{\operatorname{tg} \delta_{\text{бм}}}{1 + \frac{\varepsilon_{\text{бм}} \cdot \left[\left(\frac{\gamma_{\text{к}} - k \cdot \gamma_{\text{каб}}}{k \cdot \gamma_{\text{каб}}} \right) \right]}{\varepsilon_{\text{каб}}}} + \frac{\operatorname{tg} \delta_{\text{каб}}}{1 + \frac{\varepsilon_{\text{п}} \cdot \left[\left(\frac{k \cdot \gamma_{\text{каб}}}{\gamma_{\text{к}} - k \cdot \gamma_{\text{каб}}} \right) \right]}{\varepsilon_{\text{бм}}}} = 2.442 \cdot 10^{-3} \quad -$$

тангенс угла диэлектрических потерь пропитанной изоляции
(кабельная бумага);

Произведем расчет диэлектрической проницаемости и тангенса угла
диэлектрических потерь для кабельной бумаги при температуре 80 °С.

$$\varepsilon_{\text{бкаб}} = \frac{\varepsilon_{\text{бм}}}{1 + \frac{\gamma_{\text{п}} \cdot k \left[\left(\frac{\varepsilon_{\text{бм}}}{\varepsilon_{\text{каб}}} \right) - 1 \right]}{\gamma_{\text{к}}}} = \frac{3.86}{1 + \frac{900 \cdot 1 \left[\left(\frac{3.86}{2.25} \right) - 1 \right]}{1550}} = 3.447 \quad -$$

диэлектрическая проницаемость бумажно – пропитанной изоляции;

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{каб}} = \frac{\operatorname{tg} \delta_{\text{бм}}}{1 + \frac{\varepsilon_{\text{бм}} \cdot \left[\left(\frac{\gamma_{\text{к}} - k \cdot \gamma_{\text{каб}}}{k \cdot \gamma_{\text{каб}}} \right) \right]}{\varepsilon_{\text{каб}}}} + \frac{\operatorname{tg} \delta_{\text{каб}}}{1 + \frac{\varepsilon_{\text{каб}} \cdot \left[\left(\frac{k \cdot \gamma_{\text{каб}}}{\gamma_{\text{к}} - k \cdot \gamma_{\text{каб}}} \right) \right]}{\varepsilon_{\text{бм}}}} = 4.418 \cdot 10^{-3} \quad -$$

тангенс угла диэлектрических потерь бумажно – пропитанной изоляции
(кабельная бумага);

Для построения графика температурной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь комбинированной изоляции, определим постоянные коэффициенты.

$$a_m = \frac{\ln \cdot (tg\delta_{\text{ом}}) - \ln \cdot (tg\delta_m)}{20 - 80} = \frac{\ln \cdot (2.198 \cdot 10^{-3}) - \ln \cdot (5.755 \cdot 10^{-3})}{20 - 80} = 0.016;$$

$$tg\delta_{0m} = \frac{tg\delta_{\text{ом}}}{e^{a_m \cdot 80}} = \frac{2.198 \cdot 10^{-3}}{3.608} = 6.092 \cdot 10^{-4};$$

$$tg\delta_{m1n} = tg\delta_{0m} \cdot e^{a_m \cdot T_{1n}};$$

$$a_n = \frac{\ln \cdot (tg\delta_{\text{он}}) - \ln \cdot (tg\delta_n)}{20 - 80} = \frac{\ln \cdot (1.148 \cdot 10^{-3}) - \ln \cdot (2.847 \cdot 10^{-3})}{20 - 80} = 0.015;$$

$$tg\delta_{0n} = \frac{tg\delta_{\text{он}}}{e^{a_n \cdot 80}} = \frac{1.148 \cdot 10^{-3}}{3.608} = 3.418 \cdot 10^{-4};$$

$$tg\delta_{n1n} = tg\delta_{0n} \cdot e^{a_n \cdot T_{1n}};$$

$$a_{\text{ж}} = \frac{\ln \cdot (tg\delta_{\text{ж}}) - \ln \cdot (tg\delta_{\text{ж}})}{20 - 80} = \frac{\ln \cdot (5 \cdot 10^{-4}) - \ln \cdot (5 \cdot 10^{-3})}{20 - 80} = 0.038;$$

$$tg\delta_{0\text{ж}} = \frac{tg\delta_{\text{ж}}}{e^{a_{\text{ж}} \cdot 80}} = \frac{5 \cdot 10^{-4}}{3.608} = 2.321 \cdot 10^{-4};$$

$$tg\delta_{\text{ж}1n} = tg\delta_{0\text{ж}} \cdot e^{a_{\text{ж}} \cdot T_{1n}};$$

Для кабельной бумаги

$$tg\delta_{\text{каб}} = 2.442 \cdot 10^{-3};$$

$$tg\delta_{\text{каб}1} = 4.418 \cdot 10^{-3};$$

$$a_{\text{каб}} = \frac{\ln \cdot (tg\delta_{\text{каб}}) - \ln \cdot (tg\delta_{\text{каб}1})}{20 - 80};$$

$$tg\delta_{0каб} = \frac{tg\delta_{каб}}{e^{a_{каб} \cdot 80}};$$

$$tg\delta_{каб1n} = tg\delta_{0каб} \cdot e^{a_{каб} \cdot T_{1n}};$$

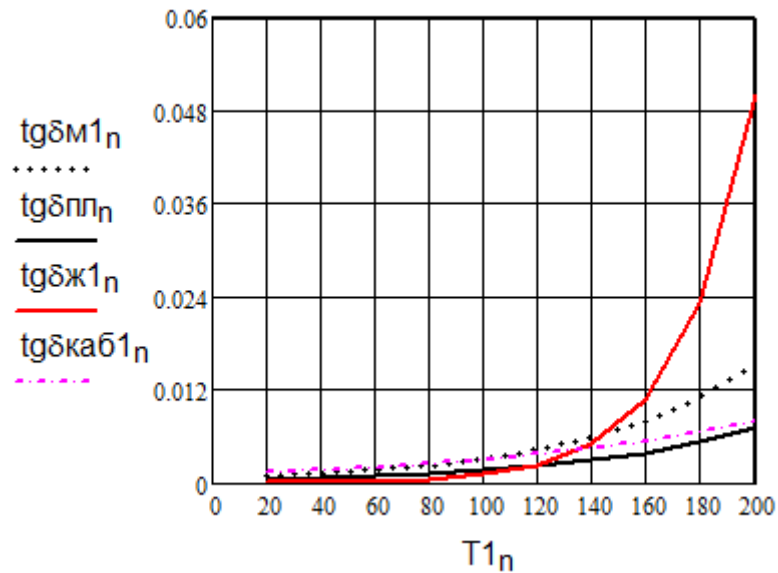


Рисунок 4 - График температурной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь.

Уточним характер температурной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь комбинированной изоляции через объемные доли компонентов.

$$tg\delta_{об} = \varepsilon\epsilon_{мп} \cdot \left(\frac{\Theta_1 \cdot tg\delta_k}{\varepsilon_k} + \frac{\Theta_3 \cdot tg\delta_{ж}}{\varepsilon_{ж}} + \frac{\Theta_2 \cdot tg\delta_{п}}{\varepsilon_{п}} \right) =$$

$$2.843 \cdot \left(\frac{0.323 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{6.6} + \frac{0.177 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{2.2} + \frac{0.5 \cdot 3 \cdot 10^{-4}}{2.25} \right) = 9.989 \cdot 10^{-4};$$

$$tg\delta_{об} = \varepsilon\epsilon_{мп} \cdot \left(\frac{\Theta_1 \cdot tg\delta_k}{\varepsilon_k} + \frac{\Theta_3 \cdot tg\delta_{ж}}{\varepsilon_{ж}} + \frac{\Theta_2 \cdot tg\delta_{п}}{\varepsilon_{п}} \right) =$$

$$2.843 \cdot \left(\frac{0.323 \cdot 7 \cdot 10^{-3}}{6.6} + \frac{0.177 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{2.2} + \frac{0.5 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{2.25} \right) = 2.435 \cdot 10^{-3};$$

$$a_{06} = \frac{\ln \cdot (tg_{06}) - \ln \cdot (tg\delta_{06})}{20 - 80} = \frac{\ln \cdot (9.989 \cdot 10^{-4}) - \ln \cdot (2.435 \cdot 10^{-3})}{20 - 80} = 0.015;$$

$$tg\delta_{006} = \frac{tg_{06}}{e^{a_{06} \cdot 80}} = \frac{9.989 \cdot 10^{-4}}{3.28} = 3.045 \cdot 10^{-4};$$

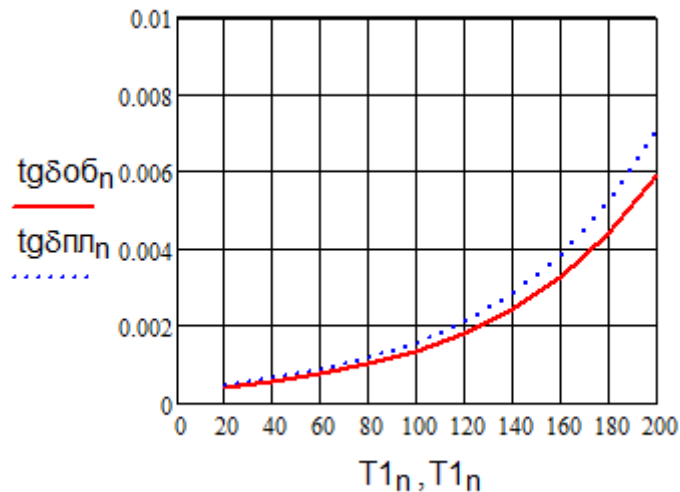


Рисунок 5 – Характер температурной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь.

Как видно из представленного графика, зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от температуры в комбинированной изоляции с учетом объемных долей лежит немного ниже зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от температуры в комбинированной изоляции без учета объемных долей. Принимаем для дальнейших расчетов зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от температуры без учета объемных долей, учитывая возможность повышения $tg\delta$ за счет потерь на поляризацию.

Для проведения теплового расчета зададим 4 значения температуры в центральной точке секции (рис. 4). Приняли теплоотвод только в сторону боковых стенок корпуса.

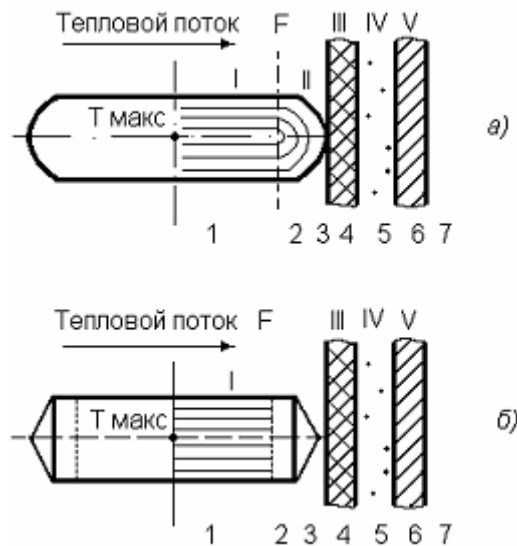


Рисунок 6 – Схема движения теплового потока конденсатора для секций а) со скрытой фольгой, б) с выступающей фольгой.

Находим диэлектрические потери.

- для секций со скрытой фольгой

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot 3.14 \cdot 500 = 3.142 \cdot 10^3;$$

$$P_{\text{дск}} = U_c^2 \cdot \omega \cdot C_{\text{сск1}} \cdot \text{tg} \delta_{\text{пл}} = 666.66^2 \cdot 3.142 \cdot 10^3 \cdot 4.13 \cdot 10^{-6} \cdot \text{tg} \delta_{\text{пл}}$$

$$P_{\text{дск}} = \begin{pmatrix} 2.668 \\ 3.612 \\ 4.889 \\ 6.619 \end{pmatrix} \text{ Вт};$$

- для секций с выступающей фольгой

$$P_{\text{дв}} = U_c^2 \cdot \omega \cdot C_{\text{св1}} \cdot \text{tg} \delta_{\text{пл}} = 666.66^2 \cdot 3.142 \cdot 10^3 \cdot 4.13 \cdot 10^{-6} \cdot \text{tg} \delta_{\text{пл}}$$

$$P_{\text{дв}} = \begin{pmatrix} 2.669 \\ 3.612 \\ 4.89 \\ 6.619 \end{pmatrix} \text{ Вт};$$

Находим потери в обкладках, принимая

$$T_0 = 20^{\circ}\text{C}; \rho_0 = 28 \cdot 10^{-9}; k_3 = 0.9;$$

$$l_{\text{выст}} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \alpha \rho_{\phi} = 0.0045 \frac{1}{\text{град}};$$

- для секций со скрытой фольгой

Активная длина обкладки

$$L_{\text{аск}} = \frac{\Delta_{\text{сск}} \cdot k_3}{2 \cdot (d + \Delta_{\phi})} \cdot \left(h_{\text{сск}} - \Delta_{\text{сск}} + \frac{\pi}{4} \cdot \Delta_{\text{сск}} \cdot k_3 \right) =$$

$$\frac{0.011 \cdot 0.9}{2 \cdot (4 \cdot 10^{-5} + 1.2 \cdot 10^{-5})} \cdot \left(0.12 - 0.011 + \frac{3.14}{4} \cdot 0.011 \cdot 0.9 \right) = 11.116;$$

- для секций с выступающей фольгой

$$L_{\text{ав}} = \frac{\Delta_{\text{св}} \cdot k_3}{2 \cdot (d + \Delta_{\phi})} \cdot \left(h_{\text{св}} - \Delta_{\text{св}} + \frac{\pi}{4} \cdot \Delta_{\text{св}} \cdot k_3 \right) =$$

$$\frac{0.012 \cdot 0.9}{2 \cdot (4 \cdot 10^{-5} + 1.2 \cdot 10^{-5})} \cdot \left(0.32 - 0.012 + \frac{3.14}{4} \cdot 0.012 \cdot 0.9 \right) = 32.865;$$

Находим потери в обкладках.

- для секций со скрытой фольгой

$$P_{\text{фск}} = \frac{1}{6} \left(\frac{U_c \cdot \omega \cdot C_{\text{сск1}}}{n_{\text{ск}}} \right)^2 \cdot \frac{L_{\text{аск}}}{(b_{\text{сск}} - 2 \cdot \Delta l) \cdot \Delta_{\phi}} \cdot \rho_0 [1 + \alpha \rho_{\phi} \cdot (T_1 - T_0)];$$

- для секций с выступающей фольгой

$$P_{\text{фв}} = \frac{2}{3} \frac{(U_c \cdot \omega \cdot C_{\text{св1}})^2}{L_{\text{ав}} \cdot \Delta_{\phi}} \cdot (b_{\text{св}} + \Delta l + 3 \cdot l_{\text{выст}}) \cdot \rho_0 [1 + \alpha \rho_{\phi} \cdot (T_1 - T_0)];$$

$$P_{\text{фск}} = \begin{pmatrix} 1.029 \\ 1.122 \\ 1.215 \\ 1.307 \end{pmatrix}; \quad P_{\text{фв}} = \begin{pmatrix} 4.648 \cdot 10^{-4} \\ 5.066 \cdot 10^{-4} \\ 5.484 \cdot 10^{-4} \\ 5.902 \cdot 10^{-4} \end{pmatrix}.$$

Тепловыделение в секции.

- со скрытой фольгой

$$P_{\text{сск}} = P_{\text{дск}} + P_{\text{фск}};$$

- с выступающей фольгой

$$P_{\text{св}} = P_{\text{дв}} + P_{\text{фв}};$$

$$P_{\text{сск}} = \begin{pmatrix} 3.698 \\ 4.734 \\ 6.01 \\ 7.926 \end{pmatrix} \text{ Вт}; \quad P_{\text{св}} = \begin{pmatrix} 2.669 \\ 3.613 \\ 4.89 \\ 6.62 \end{pmatrix} \text{ Вт}.$$

Удельное тепловыделение в секции

- со скрытой фольгой

$$q_{\text{сск}} = \frac{P_{\text{сск}}}{(b_{\text{сск}} - 2 \cdot \Delta l) \cdot h_{\text{сск}} \cdot \Delta_{\text{сск}}} = \begin{pmatrix} 8.876 \cdot 10^3 \\ 1.136 \cdot 10^3 \\ 1.465 \cdot 10^3 \\ 1.903 \cdot 10^3 \end{pmatrix} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3};$$

- с выступающей фольгой

$$q_{\text{св}} = \frac{P_{\text{св}}}{(b_{\text{св}} - 2 \cdot \Delta l) \cdot h_{\text{св}} \cdot \Delta_{\text{св}}} = \begin{pmatrix} 6.013 \cdot 10^3 \\ 8.139 \cdot 10^3 \\ 1.102 \cdot 10^4 \\ 1.491 \cdot 10^4 \end{pmatrix} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3};$$

Расчет перепадов температур на отдельных участках согласно схеме движения теплового потока.

Примем следующие характеристики:

Найдем эквивалентную теплопроводность на I-ом участке, когда слои последовательны.

$$\lambda_{\text{экв}} = \frac{\lambda_{\text{ом}} \cdot n_1 \cdot \delta_1 + \lambda_{\text{ф}} \cdot \Delta_{\text{ф}} + \lambda_{\text{п}} \cdot n_2 \cdot \delta_2}{n_1 \cdot \delta_1 + n_2 \cdot \delta_2 + \Delta_{\text{ф}}} =$$

$$\frac{0.21 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 10^{-5} + 200 \cdot 1.2 \cdot 10^{-5} + 0.2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 1 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 1 \cdot 10^{-5} + 1.2 \cdot 10^{-5}} = 46.312 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}};$$

Перепад температуры на I участке секции.

Со скрытой фольгой

$$\Delta T_{\text{1ск}} = q_{\text{сск}} \cdot \frac{(h_{\text{сск}} - \Delta_{\text{сск}})^2}{8 \cdot \lambda_{\text{экв1}}} = \begin{pmatrix} 0.285 \\ 0.364 \\ 0.47 \\ 0.61 \end{pmatrix} \text{град};$$

С выступающей фольгой

$$\Delta T_{\text{1ск}} = q_{\text{св}} \cdot \frac{(h_{\text{св}} - 2 \cdot \Delta l)^2}{8 \cdot \lambda_{\text{экв1}}} = \begin{pmatrix} 0.217 \\ 0.294 \\ 0.397 \\ 0.538 \end{pmatrix} \text{град};$$

Найдем эквивалентную теплопроводность на II участке секции, когда на один слой фольги приходится два слоя изоляции.

В секции со скрытой фольгой, тепловой поток пересекает слои перпендикулярно

$$\lambda_{\text{экв2ск}} = \frac{n_1 \cdot \delta_1 + n_2 \cdot \delta_2 + \Delta_{\text{ф}}}{\frac{n_1 \cdot \delta_1}{\lambda_{\text{ом}}} + \frac{n_2 \cdot \delta_2}{\lambda_{\text{п}}} + \frac{\Delta_{\text{ф}}}{\lambda_{\text{ф}}}} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 1 \cdot 10^{-5} + 1.2 \cdot 10^{-5}}{\frac{2 \cdot 1 \cdot 10^{-5}}{0.21} + \frac{2 \cdot 1 \cdot 10^{-5}}{0.2} + \frac{1.2 \cdot 10^{-5}}{200}} = 0.26 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}};$$

В секции с выступающей фольгой, на один слой фольги приходится два слоя изоляции, и тепловой поток движется параллельно слоям

$$\lambda_{\text{экв2в}} = \frac{2 \cdot \lambda_{\text{ом}} \cdot n_1 \cdot \delta_1 + 2 \cdot \lambda_{\text{п}} \cdot n_2 \cdot \delta_2 + \lambda_{\text{ф}} \cdot \Delta_{\text{ф}}}{2 \cdot d + \Delta_{\text{ф}}} =$$

$$\frac{2 \cdot 0.21 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 0.2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 10^{-5} + 200 \cdot 1.2 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 4 \cdot 10^{-5} + 1.2 \cdot 10^{-5}} = 26.26 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}};$$

Перепад температуры на II участке

Для секций со скрытой фольгой

$$\Delta T_{\text{2ск}} = q_{\text{сск}} \cdot \frac{\Delta_{\text{сск}}^2}{8 \cdot \lambda_{\text{экв2ск}}} \cdot \left[1 + \frac{2(h_{\text{сск}} - \Delta_{\text{сск}})}{\Delta_{\text{сск}}} \right] = \begin{pmatrix} 10.497 \\ 13.439 \\ 17.328 \\ 22.499 \end{pmatrix} \text{град};$$

Для секций с выступающей фольгой

$$\Delta T_{\text{2в}} = q_{\text{св}} \cdot \frac{b_{\text{св}} - 2 \cdot \Delta l}{2} \cdot \frac{\Delta l}{\lambda_{\text{экв2}}} = \begin{pmatrix} 0.029 \\ 0.039 \\ 0.053 \\ 0.072 \end{pmatrix} \text{град};$$

Найдем эквивалентную теплопроводность на участке спайки для секций с выступающей фольгой.

$$\lambda_{\text{экв3в}} = \lambda_{\text{ж}} + \frac{(\lambda_{\text{ф}} - \lambda_{\text{ж}}) \cdot \Delta_{\text{ф}} \cdot k_3}{n_1 \cdot \delta_1 + n_2 \cdot \delta_2 + \Delta_{\text{ф}}} =$$

$$0.14 + \frac{(200 - 0.14) \cdot 1.2 \cdot 10^{-5} \cdot 0.9}{2 \cdot 1 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 1 \cdot 10^{-5} + 1.2 \cdot 10^{-5}} = 41.6 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}};$$

Перепад температуры на участке спайки для секций с выступающей фольгой.

$$\Delta T_{3B} = q_{CB} \cdot \frac{b_{CB} - 2 \cdot \Delta l}{2} \cdot \frac{\Delta_{СП}}{\lambda_{ЭКВЗВ}} = \begin{pmatrix} 0.025 \\ 0.034 \\ 0.046 \\ 0.062 \end{pmatrix} \text{град};$$

Температура на поверхности секции.

Со скрытой фольгой

$$T_{иск} = T_1 - \Delta T_{1ск} - \Delta T_{2ск} - \Delta T_{3ск} = \begin{pmatrix} 9.218 \\ 26.197 \\ 42.202 \\ 56.89 \end{pmatrix} \text{град};$$

С выступающей фольгой

$$T_{ив} = T_1 - \Delta T_{1в} - \Delta T_{2в} - \Delta T_{3в} = \begin{pmatrix} 19.729 \\ 39.633 \\ 59.503 \\ 79.328 \end{pmatrix} \text{град};$$

Тепловыделение в изоляции от корпуса.

Для секций со скрытой фольгой

$$tg \delta_{ск} = tg \delta_{0каб} \cdot e^{акаб \cdot T_{иск}}$$

$$q_{4ск} = \left(\frac{U_H \cdot \epsilon_{ж}}{\epsilon_{ж} \cdot \Delta_{изк} + \epsilon_{бм} \cdot \Delta_{ж}} \right)^2 \cdot \omega \cdot \epsilon_{бм} \cdot \epsilon_0 \cdot \Delta_{изк} \cdot tg \delta_{ск} = \begin{pmatrix} 2.727 \cdot 10^{-8} \\ 3.225 \cdot 10^{-8} \\ 3.777 \cdot 10^{-8} \\ 4.367 \cdot 10^{-8} \end{pmatrix};$$

Для секций с выступающей фольгой

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{в}} = \operatorname{tg} \delta_{0\text{каб}} \cdot e^{\alpha_{\text{каб}} \cdot T_{\text{и6}}}$$

$$q_{4\text{в}} = \left(\frac{U_{\text{н}} \cdot \varepsilon_{\text{ж}}}{\varepsilon_{\text{ж}} \cdot \Delta_{\text{изк}} + \varepsilon_{\text{бм}} \cdot \Delta_{\text{ж}}} \right)^2 \cdot \omega \cdot \varepsilon_{\text{бм}} \cdot \varepsilon_0 \cdot \Delta_{\text{изк}} \cdot \operatorname{tg} \delta_{\text{в}} = \begin{pmatrix} 3.025 \cdot 10^{-8} \\ 3.683 \cdot 10^{-8} \\ 4.482 \cdot 10^{-8} \\ 5.451 \cdot 10^{-8} \end{pmatrix};$$

Найдем эквивалентную теплопроводность в изоляции от корпуса.

$$\lambda_{\text{экв.кор}} = \frac{\Delta_{\text{изк}} + \Delta_{\text{ф}}}{\frac{\Delta_{\text{изк}}}{\lambda_{\text{бм}}} + \frac{\Delta_{\text{ф}}}{\lambda_{\text{ф}}}} = \frac{2 \cdot 10^{-4} + 1.2 \cdot 10^{-5}}{\frac{2 \cdot 10^{-4}}{0.21} + \frac{1.2 \cdot 10^{-5}}{200}} = 0.223 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}};$$

Перепад температуры в изоляции от корпуса.

Для секций со скрытой фольгой.

$$\Delta T_{4\text{ск}} = \left(q_{\text{сск}} \cdot \frac{h_{\text{сск}}}{2} + \frac{q_{4\text{ск}}}{2} \right) \cdot \frac{\Delta_{\text{изк}}}{\lambda_{\text{экв.кор}}} = \begin{pmatrix} 0.479 \\ 0.613 \\ 0.79 \\ 1.026 \end{pmatrix} \text{град};$$

Для секций с выступающей фольгой.

$$\Delta T_{4\text{в}} = \left(q_{\text{св}} \cdot \frac{b_{\text{св}} - 2 \cdot \Delta l}{2} + \frac{q_{4\text{в}}}{2} \right) \cdot \frac{\Delta_{\text{изк}}}{\lambda_{\text{экв.кор}}} = \begin{pmatrix} 0.312 \\ 0.423 \\ 0.572 \\ 0.774 \end{pmatrix} \text{град};$$

Температура на поверхности изоляции от корпуса.

Со скрытой фольгой.

$$T_{\text{иск}} = T_1 - \Delta T_{1\text{ск}} - \Delta T_{2\text{ск}} - \Delta T_{3\text{ск}} - T_{4\text{ск}} = \begin{pmatrix} 8.74 \\ 25.584 \\ 41.412 \\ 55.865 \end{pmatrix} \text{град};$$

С выступающей фольгой.

$$T_{\text{ив}} = T_1 - \Delta T_{1\text{в}} - \Delta T_{2\text{в}} - \Delta T_{3\text{в}} - T_{4\text{в}} = \begin{pmatrix} 19.417 \\ 39.21 \\ 58.493 \\ 78.553 \end{pmatrix} \text{град};$$

Тепловыделение в зазоре между изоляцией и корпусом (в масляной прослойке).

Для секций со скрытой фольгой

$$\text{tg}\delta_{\text{жск}} = \text{tg}\delta_{0\text{ж}} \cdot e^{\alpha_{\text{ж}} \cdot T_{\text{иск}}}$$

$$q_{5\text{ск}} = \left(\frac{U_{\text{н}} \cdot \varepsilon_{\text{бм}}}{\varepsilon_{\text{ж}} \cdot \Delta_{\text{изк}} + \varepsilon_{\text{бм}} \cdot \Delta_{\text{ж}}} \right)^2 \cdot \omega \cdot \varepsilon_{\text{ж}} \cdot \varepsilon_0 \cdot \Delta_{\text{ж}} \cdot \text{tg}\delta_{\text{жск}} = \begin{pmatrix} 6.399 \cdot 10^{-9} \\ 1.221 \cdot 10^{-8} \\ 2.242 \cdot 10^{-8} \\ 3.904 \cdot 10^{-8} \end{pmatrix} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3};$$

Для секций с выступающей фольгой

$$\text{tg}\delta_{\text{жв}} = \text{tg}\delta_{0\text{ж}} \cdot e^{\alpha_{\text{ж}} \cdot T_{\text{ив}}}$$

$$q_{5\text{в}} = \left(\frac{U_{\text{н}} \cdot \varepsilon_{\text{бм}}}{\varepsilon_{\text{ж}} \cdot \Delta_{\text{изк}} + \varepsilon_{\text{бм}} \cdot \Delta_{\text{ж}}} \right)^2 \cdot \omega \cdot \varepsilon_{\text{ж}} \cdot \varepsilon_0 \cdot \Delta_{\text{ж}} \cdot \text{tg}\delta_{\text{жв}} = \begin{pmatrix} 9.64 \cdot 10^{-9} \\ 2.06 \cdot 10^{-8} \\ 4.392 \cdot 10^{-8} \\ 9.326 \cdot 10^{-8} \end{pmatrix} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3};$$

Перепад температуры в масляной прослойке с учетом конвекции.

$$\varepsilon_{\text{конв}} = 1; \lambda_{\text{экв.5}} = \lambda_{\text{ж}} \cdot \varepsilon_{\text{конв}} = 0.15;$$

Для секций со скрытой фольгой.

$$\Delta T_{5\text{ск}} = \left(q_{\text{сск}} \cdot \frac{h_{\text{сск}}}{2} + q_{4\text{ск}} + \frac{q_{5\text{ск}}}{2} \right) \cdot \frac{\Delta_{\text{ж}}}{\lambda_{\text{экв.5}}} = \begin{pmatrix} 3.804 \\ 4.87 \\ 6.28 \\ 8.154 \end{pmatrix} \text{град};$$

Для секций с выступающей фольгой.

$$\Delta T_{5\text{в}} = \left(q_{\text{св}} \cdot \frac{b_{\text{св}} - 2 \cdot \Delta l}{2} + q_{4\text{в}} + \frac{q_{5\text{в}}}{2} \right) \cdot \frac{\Delta_{\text{ж}}}{\lambda_{\text{экв.5}}} = \begin{pmatrix} 2.482 \\ 3.36 \\ 4.548 \\ 6.157 \end{pmatrix} \text{град};$$

Тепловыделение в конденсаторе найдем, пренебрегая потерями в соединительных проводах.

Для секций со скрытой фольгой

$$S_{\text{кск}} = 2 \cdot H_{\text{кск}} \cdot (B_{\text{кск}} + L_{\text{кск}}) = 2 \cdot 0.381 \cdot (0.121 + 0.438) = 0.427 \text{ м}^2;$$

$$Q_{\text{ск}} = P_{\text{сск}} \cdot n_{\text{пос}} \cdot n_{\text{пар1}} + q_{4\text{ск}} \cdot S_{\text{кск}} + q_{5\text{ск}} \cdot S_{\text{кск}}$$

$$Q_{\text{ск}} = \begin{pmatrix} 144.213 \\ 184.629 \\ 238.06 \\ 309.11 \end{pmatrix} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3};$$

Для секций с выступающей фольгой.

$$S_{\text{кск}} = 2 \cdot H_{\text{кв}} \cdot (B_{\text{кв}} + L_{\text{кв}}) = 2 \cdot 0.381 \cdot (0.121 + 0.477) = 0.456 \text{ м}^2;$$

$$Q_{\text{в}} = P_{\text{св}} \cdot n_{\text{пос}} \cdot n_{\text{пар2}} + q_{4\text{в}} \cdot S_{\text{кв}} + q_{5\text{в}} \cdot S_{\text{кв}}$$

$$Q_{\text{ск}} = \begin{pmatrix} 104.093 \\ 140.901 \\ 190.726 \\ 258.171 \end{pmatrix} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3};$$

Перепад температуры в стенке корпуса.

$$\lambda_{\text{ст}} = 5 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}};$$

Для секций со скрытой фольгой.

$$\Delta T_{6\text{ск}} = \frac{Q_{\text{ск}} \cdot \Delta_{\text{мет}}}{S_{\text{кск}} \cdot \lambda_{\text{ст}}} = \begin{pmatrix} 3.128 \cdot 10^{-3} \\ 4.005 \cdot 10^{-3} \\ 5.164 \cdot 10^{-5} \\ 6.705 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix} \text{град};$$

Для секций с выступающей фольгой.

$$\Delta T_{6\text{в}} = \frac{Q_{\text{в}} \cdot \Delta_{\text{мет}}}{S_{\text{кв}} \cdot \lambda_{\text{ст}}} = \begin{pmatrix} 2.114 \cdot 10^{-3} \\ 2.862 \cdot 10^{-3} \\ 3.874 \cdot 10^{-5} \\ 5.244 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix} \text{град};$$

Температура на поверхности корпуса.

$$T_{\text{кск}} = T_1 - \Delta T_{1\text{ск}} - \Delta T_{2\text{ск}} - \Delta T_{3\text{ск}} - T_{4\text{ск}} - \Delta T_{5\text{ск}} - T_{6\text{ск}} = \begin{pmatrix} 4.933 \\ 20.71 \\ 35.128 \\ 47.704 \end{pmatrix} \text{град};$$

$$T_{\text{кв}} = T_1 - \Delta T_{1\text{в}} - \Delta T_{2\text{в}} - \Delta T_{3\text{в}} - T_{4\text{в}} - \Delta T_{5\text{в}} - T_{6\text{в}} = \begin{pmatrix} 16.932 \\ 35.847 \\ 54.379 \\ 72.391 \end{pmatrix} \text{град};$$

Найдем перепад температур, в воздухе используя критерии теплового подобия [10].

Зададим перепад температур в воздухе

$$\Delta t_{\text{зад1}} = 5 \text{ град};$$

$$\Delta t_{\text{зад2}} = 10 \text{ град};$$

Для секций со скрытой фольгой

$$T_{\text{i1ск}} = T_{\text{кск}} - \Delta t_{\text{зад1}} = \begin{pmatrix} -0.67 \\ 15.71 \\ 30.128 \\ 42.704 \end{pmatrix} \text{град}; \quad T_{\text{i2ск}} = T_{\text{кск}} - \Delta t_{\text{зад2}} = \begin{pmatrix} -5.067 \\ 10.71 \\ 25.128 \\ 37.704 \end{pmatrix} \text{град};$$

Для секций с выступающей фольгой

$$T_{\text{i1в}} = T_{\text{кв}} - \Delta t_{\text{зад1}} = \begin{pmatrix} 11.932 \\ 30.847 \\ 49.379 \\ 67.391 \end{pmatrix} \text{град}; \quad T_{\text{i2в}} = T_{\text{кв}} - \Delta t_{\text{зад2}} = \begin{pmatrix} 6.932 \\ 25.847 \\ 44.379 \\ 62.391 \end{pmatrix} \text{град};$$

При этих температурах найдем характеристики воздуха (коэффициент теплопроводности, кинематическую вязкость, коэффициент Прандтля), используя эмпирические уравнения [11].

Для секций со скрытой фольгой.

$$\lambda_{\text{1ск}} = (2.44 + 0.0077 \cdot T_{\text{i1ск}}) \cdot 0.01;$$

$$\lambda_{2\text{ск}} = (2.44 + 0.0077 \cdot T_{i2\text{ск}}) \cdot 0.01;$$

$$\lambda_{1\text{ск}} = \begin{pmatrix} 0.024 \\ 0.026 \\ 0.027 \\ 0.028 \end{pmatrix}; \quad \lambda_{2\text{ск}} = \begin{pmatrix} 0.024 \\ 0.025 \\ 0.026 \\ 0.027 \end{pmatrix};$$

Для секций с выступающей фольгой

$$\lambda_{1\text{б}} = (2.44 + 0.0077 \cdot T_{i1\text{б}}) \cdot 0.01;$$

$$\lambda_{2\text{б}} = (2.44 + 0.0077 \cdot T_{i2\text{б}}) \cdot 0.01;$$

$$\lambda_{1\text{б}} = \begin{pmatrix} 0.025 \\ 0.027 \\ 0.028 \\ 0.03 \end{pmatrix}; \quad \lambda_{2\text{б}} = \begin{pmatrix} 0.025 \\ 0.026 \\ 0.028 \\ 0.029 \end{pmatrix};$$

При этих температурах.

Для секций со скрытой фольгой.

$$v_{1\text{ск}} = (13.28 + 0.0984 \cdot T_{i1\text{ск}}) \cdot 0.000001;$$

$$v_{2\text{ск}} = (13.28 + 0.0984 \cdot T_{i2\text{ск}}) \cdot 0.000001;$$

$$v_{1\text{ск}} = \begin{pmatrix} 1.327 \cdot 10^{-5} \\ 1.483 \cdot 10^{-5} \\ 1.624 \cdot 10^{-5} \\ 1.748 \cdot 10^{-5} \end{pmatrix}; \quad v_{2\text{ск}} = \begin{pmatrix} 1.278 \cdot 10^{-5} \\ 1.433 \cdot 10^{-5} \\ 1.575 \cdot 10^{-5} \\ 1.699 \cdot 10^{-5} \end{pmatrix};$$

Для секций с выступающей фольгой.

$$v_{1\text{б}} = (13.28 + 0.0984 \cdot T_{i1\text{б}}) \cdot 0.000001;$$

$$v_{2\text{б}} = (13.28 + 0.0984 \cdot T_{i2\text{б}}) \cdot 0.000001;$$

$$v_{1B} = \begin{pmatrix} 1.445 \cdot 10^{-5} \\ 1.632 \cdot 10^{-5} \\ 1.814 \cdot 10^{-5} \\ 1.991 \cdot 10^{-5} \end{pmatrix}; \quad v_B = \begin{pmatrix} 1.396 \cdot 10^{-5} \\ 1.582 \cdot 10^{-5} \\ 1.765 \cdot 10^{-5} \\ 1.942 \cdot 10^{-5} \end{pmatrix};$$

Для секций со скрытой фольгой

$$P_{r1ck} = 0.707 - 0.0000525 \cdot T_{i1ck};$$

$$P_{r2ck} = 0.707 - 0.0000525 \cdot T_{i2ck};$$

$$P_{r1ck} = \begin{pmatrix} 0.707 \\ 0.706 \\ 0.705 \\ 0.705 \end{pmatrix}; \quad P_{r2ck} = \begin{pmatrix} 0.707 \\ 0.706 \\ 0.706 \\ 0.705 \end{pmatrix};$$

Для секций с выступающей фольгой

$$P_{r1B} = 0.707 - 0.0000525 \cdot T_{i1B};$$

$$P_{r2B} = 0.707 - 0.0000525 \cdot T_{i2B};$$

$$P_{r1B} = \begin{pmatrix} 0.706 \\ 0.705 \\ 0.704 \\ 0.703 \end{pmatrix}; \quad P_{r2B} = \begin{pmatrix} 0.707 \\ 0.706 \\ 0.705 \\ 0.704 \end{pmatrix};$$

Примем

$$g = 9.8; \quad \beta = \frac{1}{273}; \quad P_{rc} = 0.7; \quad L_{ck} = H_{кск};$$

Для секций со скрытой фольгой.

$$G_{r1ck} = g \cdot \beta \cdot \frac{L_{ck}^3}{v_{1ck}} \cdot \Delta t_{зад1}; \quad G_{r2ck} = g \cdot \beta \cdot \frac{L_{ck}^3}{v_{2ck}} \cdot \Delta t_{зад2};$$

$$G_{r1ck} = \begin{pmatrix} 5.652 \cdot 10^7 \\ 4.53 \cdot 10^7 \\ 3.774 \cdot 10^7 \\ 3.258 \cdot 10^7 \end{pmatrix}; G_{r2ck} = \begin{pmatrix} 1.219 \cdot 10^8 \\ 9.693 \cdot 10^7 \\ 8.0264 \cdot 10^7 \\ 6.899 \cdot 10^7 \end{pmatrix};$$

Для секций с выступающей фольгой

$$G_{r1b} = g \cdot \beta \cdot \frac{L_b^3}{v_{1b}^2} \cdot \Delta t_{зад1}; G_{r2b} = g \cdot \beta \cdot \frac{L_b^3}{v_{2b}^2} \cdot \Delta t_{зад2};$$

$$G_{r1b} = \begin{pmatrix} 4.751 \cdot 10^7 \\ 3.729 \cdot 10^7 \\ 3.017 \cdot 10^7 \\ 2.504 \cdot 10^7 \end{pmatrix}; G_{r2b} = \begin{pmatrix} 1.018 \cdot 10^8 \\ 7.929 \cdot 10^7 \\ 6.375 \cdot 10^7 \\ 5.265 \cdot 10^7 \end{pmatrix};$$

Для определения критерия Нуссельта [12] найдем коэффициенты C и n , характеризующие характер течения газа, в соответствии с произведением значений Gr и Pr).

При $10^3 < Gr \cdot Pr < 10^8$ $C=0.5$ $n=0.25$, при $10^3 < Gr \cdot Pr < 10^9$ $C=0.76$ $n=0.25$, при $Gr \cdot Pr > 10^9$ $C=0.15$ $n=0.33$.

Для секций со скрытой фольгой.

$$G_{r1ck} \cdot P_{r1cki} = \begin{pmatrix} 3.996 \cdot 10^7 \\ 3.199 \cdot 10^7 \\ 2.662 \cdot 10^7 \\ 2.296 \cdot 10^7 \end{pmatrix}; G_{r2ck} \cdot P_{r2cki} = \begin{pmatrix} 8.622 \cdot 10^7 \\ 6.848 \cdot 10^7 \\ 5.664 \cdot 10^7 \\ 4.864 \cdot 10^7 \end{pmatrix};$$

Для секций с выступающей фольгой.

$$G_{r1Bi} \cdot P_{r1Bi} = \begin{pmatrix} 3.356 \cdot 10^7 \\ 2.63 \cdot 10^7 \\ 2.125 \cdot 10^7 \\ 1.761 \cdot 10^7 \end{pmatrix}; \quad G_{r2Bi} \cdot P_{r2Bi} = \begin{pmatrix} 7.197 \cdot 10^7 \\ 5.595 \cdot 10^7 \\ 4.492 \cdot 10^7 \\ 3.705 \cdot 10^7 \end{pmatrix};$$

$$N_{u1cki} = 0.5 \cdot (Gr_{lcki} \cdot Pr_{lcki})^{0.25} \cdot \left(\frac{P_{r1cki}}{P_{rc}} \right)^{0.25}; \quad N_{u2cki} = 0.5 \cdot (Gr_{2cki} \cdot Pr_{2cki})^{0.25} \cdot \left(\frac{P_{r2cki}}{P_{rc}} \right)^{0.25};$$

$$N_{u1cki} = \begin{pmatrix} 39.853 \\ 37.686 \\ 35.984 \\ 34.671 \end{pmatrix}; \quad N_{u2cki} = \begin{pmatrix} 48.306 \\ 45.588 \\ 43.464 \\ 41.831 \end{pmatrix};$$

$$N_{u1Bi} = 0.5 \cdot (Gr_{lBi} \cdot Pr_{lBi})^{0.25} \cdot \left(\frac{P_{r1Bi}}{P_{rc}} \right)^{0.25}; \quad N_{u2Bi} = 0.5 \cdot (Gr_{2Bi} \cdot Pr_{2Bi})^{0.25} \cdot \left(\frac{P_{r2Bi}}{P_{rc}} \right)^{0.25};$$

$$N_{u1Bi} = \begin{pmatrix} 38.143 \\ 35.877 \\ 34.002 \\ 32.432 \end{pmatrix}; \quad N_{u2Bi} = \begin{pmatrix} 46.161 \\ 43.331 \\ 41.003 \\ 39.061 \end{pmatrix};$$

Найдем коэффициент теплоотдачи.

$$\alpha_{k1cki} = \frac{N_{u1cki} \cdot \lambda_{lcki}}{L_{ck}}; \quad \alpha_{k2cki} = \frac{N_{u2cki} \cdot \lambda_{2cki}}{L_{ck}};$$

$$\alpha_{k1cki} = \begin{pmatrix} 2.549 \\ 2.531 \\ 2.521 \\ 2.517 \end{pmatrix}; \quad \alpha_{k2cki} = \begin{pmatrix} 3.041 \\ 3.015 \\ 3.001 \\ 2.995 \end{pmatrix};$$

$$\alpha_{к1Bi} = \frac{N_{u1Bi} \cdot \lambda_{1Bi}}{L_B}; \quad \alpha_{к2cki} = \frac{N_{u2Bi} \cdot \lambda_{2Bi}}{L_B};$$

$$\alpha_{к1Bi} = \begin{pmatrix} 2.535 \\ 2.521 \\ 2.517 \\ 2.519 \end{pmatrix}; \quad \alpha_{к2Bi} = \begin{pmatrix} 3.021 \\ 3.001 \\ 2.994 \\ 2.994 \end{pmatrix};$$

Определим значения перепада температур в воздухе при заданных значениях $\Delta T_{\text{зад}}$, принимая, что теплоотвод осуществляется только через боковую поверхность конденсатора.

Для секций со скрытой фольгой.

$$S_{\text{бокск}} = 2 \cdot H_{\text{кск}} \cdot (B_{\text{кск}} \cdot L_{\text{кск}}) + B_{\text{кск}} \cdot L_{\text{кск}} = \\ 2 \cdot 0.381 \cdot (0.438 \cdot 0.121) + 0.121 \cdot 0.438 = 0.48$$

$$\Delta t_{\text{пол1cki}} = \frac{Q_{\text{cki}}}{\alpha_{к1cki} \cdot S_{\text{бокск}}}; \quad \Delta t_{\text{пол2cki}} = \frac{Q_{\text{cki}}}{\alpha_{к2cki} \cdot S_{\text{бокск}}};$$

$$\Delta t_{\text{пол1cki}} = \begin{pmatrix} 117.85 \\ 151.983 \\ 196.711 \\ 255.823 \end{pmatrix} \text{град}; \quad \Delta t_{\text{пол2cki}} = \begin{pmatrix} 98.787 \\ 127.558 \\ 165.24 \\ 215.023 \end{pmatrix} \text{град};$$

Для секций с выступающей фольгой.

$$S_{\text{бокв}} = 2 \cdot H_{\text{кв}} \cdot (B_{\text{кв}} \cdot L_{\text{кв}}) + B_{\text{кв}} \cdot L_{\text{кв}} = \\ 2 \cdot 0.381 \cdot (0.121 \cdot 0.477) + 0.121 \cdot 0.477 = 0.514$$

$$\Delta t_{\text{пол1vi}} = \frac{Q_{\text{vi}}}{\alpha_{к1vi} \cdot S_{\text{бокв}}}; \quad \Delta t_{\text{пол2vi}} = \frac{Q_{\text{vi}}}{\alpha_{к2vi} \cdot S_{\text{бокв}}};$$

$$\Delta t_{\text{пол1вi}} = \begin{pmatrix} 79.962 \\ 108.817 \\ 147.553 \\ 199.588 \end{pmatrix} \text{град}; \quad \Delta t_{\text{пол2вi}} = \begin{pmatrix} 67.094 \\ 91.411 \\ 124.053 \\ 167.9 \end{pmatrix} \text{град};$$

Для графического определения $\Delta t_{\text{воз}}$ построим график зависимости $\Delta t_{\text{зад}}$ от $\Delta t_{\text{пол}}$.

Для секций со скрытой фольгой

$$\Delta_{2\text{скi}} = \frac{\Delta t_{\text{пол1скi}} - \Delta t_{\text{пол2скi}}}{\Delta t_{\text{зад1}} - \Delta t_{\text{зад2}}}; \quad \Delta_{2\text{скi}} = \Delta t_{\text{пол1скi}} - \Delta t_{\text{зад1}} - \Delta_{1\text{скi}};$$

$$\Delta t_{\text{возскi}} = \frac{\Delta_{2\text{ск}}}{i - \Delta_{1\text{скi}}} = \begin{pmatrix} 28.449 \\ 29.976 \\ 31.283 \\ 32.382 \end{pmatrix} \text{град};$$

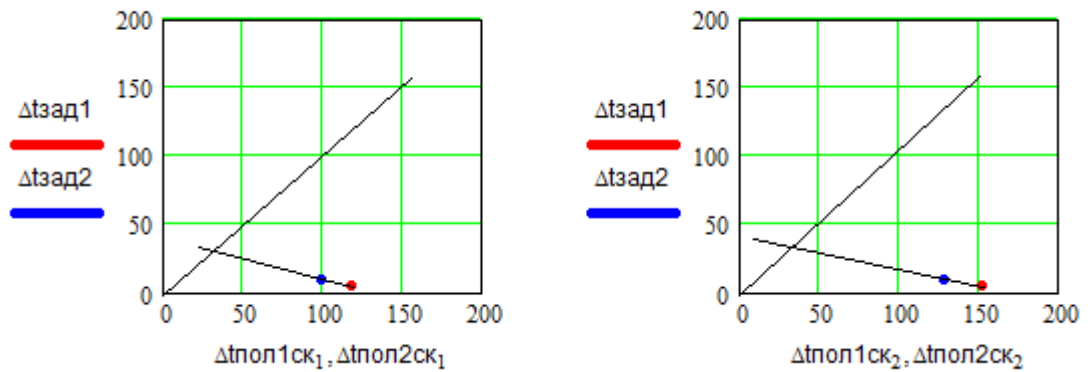


Рисунок 7 - Графики зависимости $\Delta t_{\text{зад}}$ от $\Delta t_{\text{пол}}$.

Для секций с выступающей фольгой

$$\Delta_{1\text{cki}} = \frac{\Delta t_{\text{пол1vi}} - \Delta t_{\text{пол2vi}}}{\Delta t_{\text{зад1}} - \Delta t_{\text{зад2}}}; \quad \Delta_{2\text{vi}} = \Delta t_{\text{пол1vi}} - \Delta t_{\text{зад1}} - \Delta_{1\text{vi}};$$

$$\Delta t_{\text{возvi}} = \frac{\Delta_{2\text{vi}}}{i - \Delta_{1\text{vi}}} = \begin{pmatrix} 25.976 \\ 28.167 \\ 30.009 \\ 31.519 \end{pmatrix} \text{град};$$

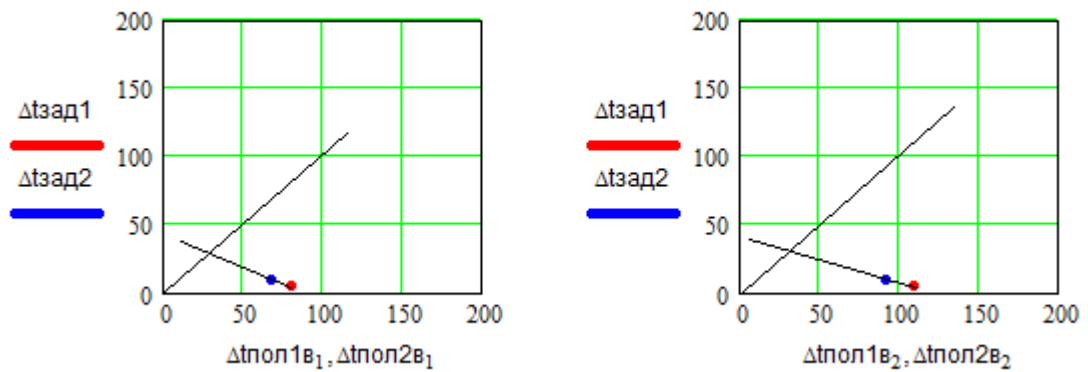


Рисунок 8 - Графики зависимости $\Delta t_{\text{зад}}$ от $\Delta t_{\text{пол}}$

$$T_{\text{осск}} = T_1 - \Delta T_{1\text{ск}} - \Delta T_{2\text{ск}} - \Delta T_{3\text{ск}} - T_{4\text{ск}} - \Delta T_{5\text{ск}} - \Delta t_{\text{возск}};$$

$$T_{\text{осв}} = T_1 - \Delta T_{1\text{в}} - \Delta T_{2\text{в}} - \Delta T_{3\text{в}} - T_{4\text{в}} - \Delta T_{5\text{в}} - \Delta t_{\text{возв}};$$

Построим график тепловой устойчивости

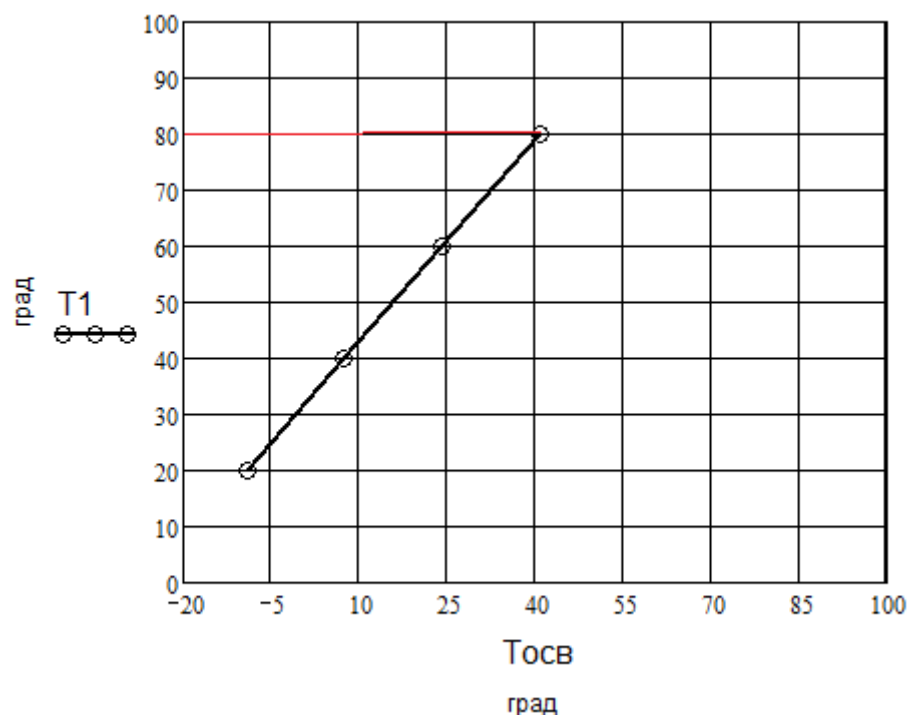


Рисунок 9 – График тепловой устойчивости для конденсатора с выступающей фольгой.

Как видно из приведенного графика при максимальной температуре окружающей среды по условиям эксплуатации (40°C) максимальная температура внутри конденсатора не превышает 80°C .

$$T_{\text{макс}} = 80^{\circ}\text{C} \text{ при } T = 40^{\circ}\text{C};$$

Из справочника [13] находим допустимые температуры для выбранных материалов и сравниваем с максимальной температурой внутри конденсатора при максимальной температуре окружающей среды согласно категории исполнения конденсатора.

$$T_{\text{доп}} = 110^{\circ}\text{C} \text{ — для полипропиленовой плёнки};$$

$$T_{\text{доп}} = 130^{\circ}\text{C} \text{ — для конденсаторного масла};$$

$$T_{\text{доп}} = 100^{\circ}\text{C} \text{ — для конденсаторной бумаги КОН–1};$$

Так как, $T_{\text{макс}}=80 < T_{\text{доп}}=110$ – для полипропиленовой пленки;
 $T_{\text{макс}}=80 < T_{\text{доп}}=130$ – для конденсаторного масла; $T_{\text{макс}}=8 < T_{\text{доп}}=100$ – для
 конденсаторной бумаги КОН 1, то условие тепловой устойчивости
 выполняется.

Для сравнения представим графики тепловой устойчивости по
 остальным рассмотренным вариантам. И сведем данные в таблицу.

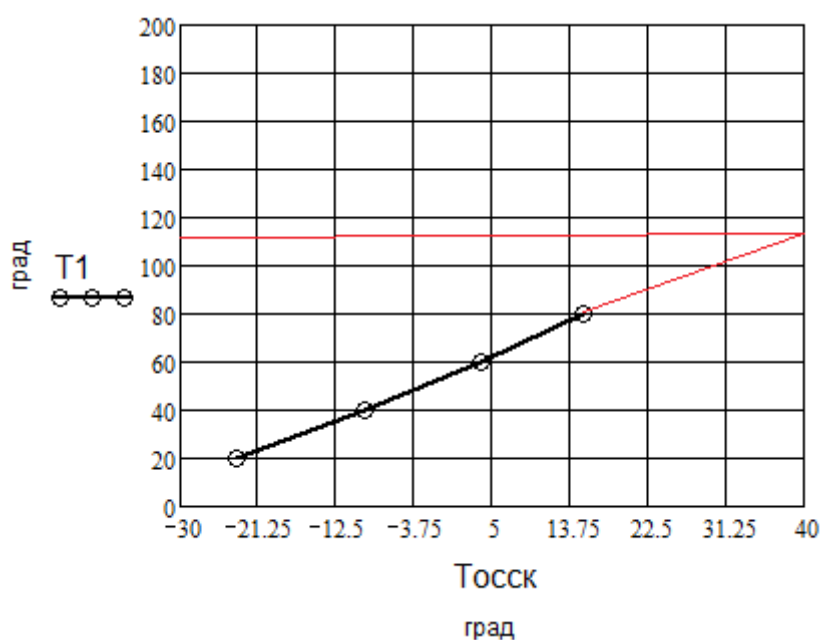


Рисунок 10 – График тепловой устойчивости для конденсатора
 со скрытой фольгой.

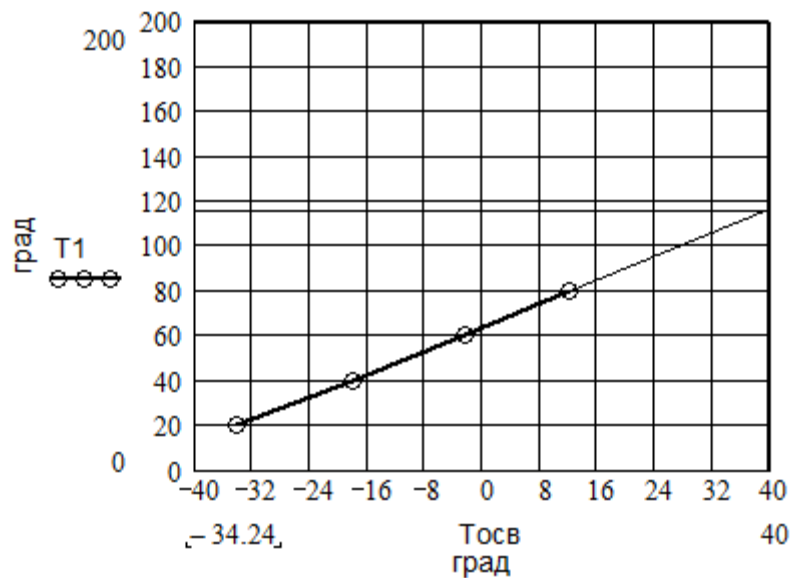


Рисунок 11 - График тепловой устойчивости электротермического конденсатора с бумажно-масляной изоляцией

Допустимая температура для используемых при расчете конденсатора материалов, для сравнения с максимальной температурой внутри конденсатора выбирается из справочника [13]. Пороговой температурой, по которой делается сравнение, является минимальная допустимая температура из всех выбранных материалов. В данном случае, проводим сравнение по допустимой температуре для конденсаторной бумаги КОН1, равной 100°C .

Таблица 7 – Допустимые и максимальные значения температур для рассмотренных вариантов.

Номер варианта	Максимальная температура внутри конденсатора, °С	Максимальная температура окружающей среды, соответствующая категории УЗ, °С	Допустимая температура для конденсаторной бумаги КОН1, °С	Максимальная температура внутри конденсатора после применения водяного охлаждения, °С
1. Комбинированная бумажно-пленочная изоляция с выступающей фольгой	80	40	100	48
2. Комбинированная бумажно-пленочная изоляция со скрытой фольгой	104			69
4. Бумажно-масляная изоляция	118			- -

Из таблицы видно, что Т_{макс} в вариантах с комбинированной бумажно-пленочной изоляцией со скрытой фольгой и бумажно - масляной изоляцией превышают допустимую температуру, а в варианте с выступающей фольгой Т_{макс} меньше допустимой температуры. Следовательно, самым оптимальным вариантом является конденсатор с комбинированной бумажно-пленочной изоляцией с выступающей фольгой.

4. Расчет срока службы

Оценку срока службы производим на основе термофлуктуационной теории [15], согласно которой под разрушением (пробоем) изоляции понимается разрыв химической связи за счет энергии тепловых флуктуации молекул диэлектрика и воздействия электрических и механических сил, вызывающих искажение энергетических диаграмм.

Произведем расчет для конденсатора с выступающей фольгой.

Для проведения расчета примем следующие параметры изоляции:

$D = 5 \cdot 10^{-19} \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ – энергия диссоциации химической связи;

$A = 1.3 \cdot 10^{-7}$ – постоянный коэффициент характеризующий материал диэлектрика;

$b = 0.002$ – температурный коэффициент;

$v_0 = 2 \cdot 10^{-7}$ – элементарный объём, содержащий хотя бы одну неоднородность;

$K = 1.38 \cdot 10^{-23}$ – постоянная Больцмана;

$\tau_0 = 1 \cdot 10^{-13}$ сек – время релаксации;

$v = 6$ – коэффициент неоднородности;

$p_0 = 0.1$ – концентрация неоднородностей;

$k = n_{\text{пос}} \cdot n_{\text{парл}}$ – количество секций;

$P_t = 0.95$ – заданная вероятность безотказной работы конденсатора;

$U_{\text{и}} = 10000$ В – амплитуда перенапряжений;

$\sigma_{\text{и}} = 300$ В – среднеквадратичное отклонение;

$N = 1000$ – количество импульсов перенапряжений;

$\tau_{\text{и}} = 20 \cdot 10^{-6}$ – длительность импульса перенапряжений;

$\tau_{\text{г}} = 31.536 \cdot 10^6$ – продолжительность года;

Найдем вероятность безотказной работы одной секции при заданной вероятности безотказной работы.

$$P_n = P_\tau^{\frac{1}{k}} = 0.9987;$$

Методом подбора найдем коэффициент (y), принимая что $F(y) = P_n$. Коэффициент неоднородности поля (в плоской системе электродов) примем равным 1.

$$y = 3.55;$$

$$v = (b_{\text{сск}} - 2 \cdot \Delta l) \cdot b_{\text{сск}} \cdot \Delta_{\text{св}} = (0.319 - 2 \cdot 2.2 \cdot 10^{-3}) \cdot 0.319 \cdot 0.012 = 1.665 \cdot 10^{-4};$$

$$F_y = \left(1 - e^{1.67 \cdot y \cdot \ln(1.3p)}\right)^{\frac{v}{v_0 \cdot \eta \cdot y}} = 0.9987;$$

Зная (y) определим коэффициент неравномерности электрического поля, создаваемой неоднородностью диэлектрика.

$$\beta_y = \frac{v}{1 + (v-1) \cdot \frac{1}{y^2 - 1} \cdot \left(\frac{y}{\sqrt{y^2 - 1}} \cdot \ln(y + \sqrt{y^2 - 1}) \right)} =$$

$$\frac{6}{1 + (6-1) \cdot \frac{1}{3.55^2 - 1} \cdot \left(\frac{y}{\sqrt{3.55^2 - 1}} \cdot \ln(3.55 + \sqrt{3.55^2 - 1}) \right)} = 3.207;$$

Примем для расчета продолжительность действия температур в соответствующий период года (по данным метеорологии).

$$\tau_i = \begin{pmatrix} 5 \cdot 10^6 \\ 19.5 \cdot 10^6 \\ 11 \cdot 10^6 \\ 6 \cdot 10^6 \end{pmatrix}; T_{\text{oc}} = \begin{pmatrix} 253 \\ 273 \\ 293 \\ 313 \end{pmatrix};$$

При данных температурах найдем температуры изоляции из графика тепловой устойчивости.

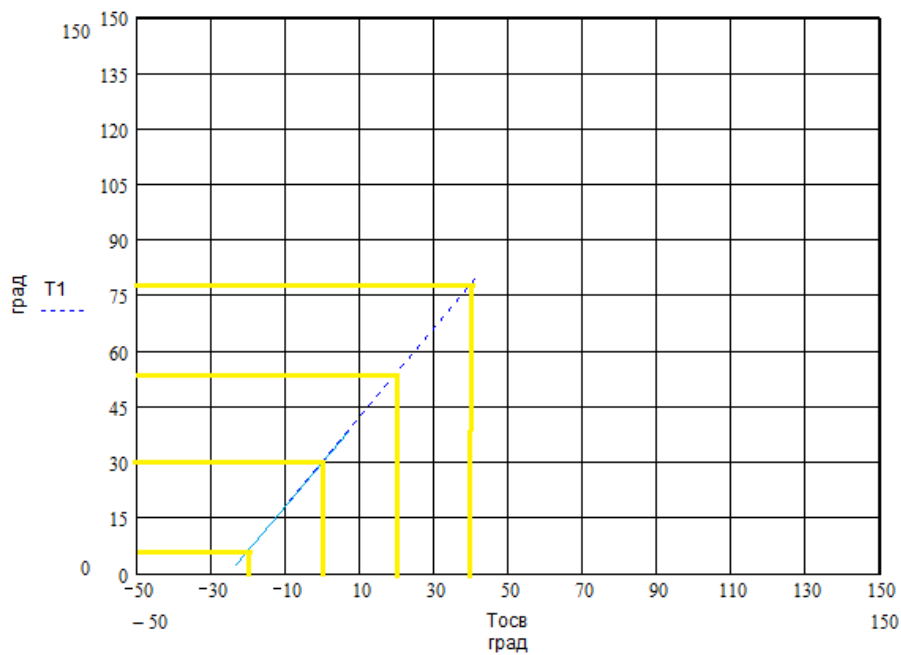


Рисунок 12 – График тепловой устойчивости при определении температуры изоляции

$$T_{изк} = \begin{pmatrix} 279 \\ 303 \\ 326 \\ 350 \end{pmatrix};$$

Перенапряжения, являющиеся случайными величинами, заменим переменными.

$$U_{\max} = U_{и} + 4 \cdot \sigma_{и} = 3.33 \cdot 10^3 + 4 \cdot 100 = 3.733 \cdot 10^3 \text{ В};$$

$$U_{\min} = U_{и} - 4 \cdot \sigma_{и} = 3.33 \cdot 10^3 - 4 \cdot 100 = 2.933 \cdot 10^3 \text{ В};$$

Число интервалов.

$$N_{\max} = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{\sigma_{и}} = \frac{3.733 \cdot 10^3 - 2.933 \cdot 10^3}{3.33 \cdot 10^3} = 8;$$

Ширина интервала.

$$\Delta U = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{N} = \frac{3.733 \cdot 10^3 - 2.933 \cdot 10^3}{8} = 100 \text{ В};$$

Примем, что распределение значений перенапряжения U_j подчиняется нормальному закону.

$$U_j := U_{\max} - (j \cdot \sigma_{\text{и}}) \quad U_{j-1} := U_{\max} - (j - 1) \cdot \sigma_{\text{и}} \quad U_{\text{срj}} := \frac{U_j + U_{j-1}}{2}$$

$j =$	$U_j =$	$U_{j-1} =$	$U_{\text{срj}} =$	$\frac{U_j - U_{\text{и}}}{2\sigma_{\text{и}}} =$	$\frac{U_{j-1} - U_{\text{и}}}{2\sigma_{\text{и}}} :$	$FU :=$
1	$3.633 \cdot 10^3$	$3.733 \cdot 10^3$	$3.683 \cdot 10^3$	1.5	2	0.00023
2	$3.533 \cdot 10^3$	$3.633 \cdot 10^3$	$3.583 \cdot 10^3$	1	1.5	0.00135
3	$3.433 \cdot 10^3$	$3.533 \cdot 10^3$	$3.483 \cdot 10^3$	0.5	1	0.00621
4	$3.333 \cdot 10^3$	$3.433 \cdot 10^3$	$3.383 \cdot 10^3$	0	0.5	0.02275
5	$3.233 \cdot 10^3$	$3.333 \cdot 10^3$	$3.283 \cdot 10^3$	-0.5	0	0.06681
6	$3.133 \cdot 10^3$	$3.233 \cdot 10^3$	$3.183 \cdot 10^3$	-1	-0.5	0.15866
7	$3.033 \cdot 10^3$	$3.133 \cdot 10^3$	$3.083 \cdot 10^3$	-1.5	-1	0.30854
8	$2.933 \cdot 10^3$	$3.033 \cdot 10^3$	$2.983 \cdot 10^3$	-2	-1.5	0.50000
9	$2.833 \cdot 10^3$	$2.933 \cdot 10^3$	$2.883 \cdot 10^3$	-2.5	-2	0.69146
10	$2.733 \cdot 10^3$	$2.833 \cdot 10^3$	$2.783 \cdot 10^3$	-3	-2.5	0.84134
11	$2.633 \cdot 10^3$	$2.733 \cdot 10^3$	$2.683 \cdot 10^3$	-3.5	-3	0.93319
12	$2.533 \cdot 10^3$	$2.633 \cdot 10^3$	$2.583 \cdot 10^3$	-4	-3.5	0.97725
13	$2.433 \cdot 10^3$	$2.533 \cdot 10^3$	$2.483 \cdot 10^3$	-4.5	-4	0.99379
14	$2.333 \cdot 10^3$	$2.433 \cdot 10^3$	$2.383 \cdot 10^3$	-5	-4.5	0.99865
						0.99977

Значения функции $F(U_j)$ определим для нормального закона распределения по таблицам интеграла Лапласа. Тогда значение $DF(U_j)$ - приращение функции на интервале найдем как $(FU_j - FU_{j-1})$.

$$\Delta F_j = FU_j - FU_{j-1}; \quad \tau_{6j} = \frac{\tau_{\text{и}} \cdot N \cdot \Delta F_j}{\tau_{\text{г}}}; \quad \eta E_j = E_{\text{рабс}} \cdot \frac{U_{\text{срj}}}{U_{\text{с}} \cdot n_{\text{пос}}};$$

$FU_j =$	$FU_{j-1} =$	$\Delta F_j =$	$\tau_{6j} =$	$\eta E_j =$
$1.35 \cdot 10^{-3}$	$2.3 \cdot 10^{-4}$	0.0011	$5.682 \cdot 10^{-15}$	$3.069 \cdot 10^7$
$6.21 \cdot 10^{-3}$	$1.35 \cdot 10^{-3}$	0.0049	$2.466 \cdot 10^{-14}$	$2.986 \cdot 10^7$
0.0228	$6.21 \cdot 10^{-3}$	0.0165	$8.392 \cdot 10^{-14}$	$2.903 \cdot 10^7$
0.0668	0.0228	0.0441	$2.235 \cdot 10^{-13}$	$2.819 \cdot 10^7$
0.1587	0.0668	0.0919	$4.66 \cdot 10^{-13}$	$2.736 \cdot 10^7$
0.3085	0.1587	0.1499	$7.604 \cdot 10^{-13}$	$2.653 \cdot 10^7$
0.5	0.3085	0.1915	$9.714 \cdot 10^{-13}$	$2.569 \cdot 10^7$
0.6915	0.5	0.1915	$9.714 \cdot 10^{-13}$	$2.486 \cdot 10^7$
0.8413	0.6915	0.1499	$7.604 \cdot 10^{-13}$	$2.403 \cdot 10^7$
0.9332	0.8413	0.0918	$4.66 \cdot 10^{-13}$	$2.319 \cdot 10^7$
0.9772	0.9332	0.0441	$2.235 \cdot 10^{-13}$	$2.236 \cdot 10^7$
0.9938	0.9772	0.0165	$8.392 \cdot 10^{-14}$	$2.153 \cdot 10^7$
0.9986	0.9938	0.0049	$2.466 \cdot 10^{-14}$	$2.069 \cdot 10^7$
0.9998	0.9986	0.0011	$5.682 \cdot 10^{-15}$	$1.986 \cdot 10^7$

Рассчитаем вероятность разрыва химической связи в диэлектрике под действием рабочей напряженности поля и с учетом перенапряжений.

При рабочей напряженности поля при температуре $T_1=279$.

$$\chi_1 = \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T_1} \cdot \beta \cdot (\eta \cdot E_{\text{рабс}}) = 0.104;$$

$$\phi \chi_1 = \sqrt{1 - 2 \cdot \chi_1} - \chi_1 \cdot \ln \left(\frac{1}{\chi_1} + \frac{1}{\chi_1} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot \chi_1} - 1 \right) = 0.594;$$

$$q_1 = \frac{1}{\tau_0} \cdot e^{\frac{-D \cdot \phi \chi_1}{2 \cdot K \cdot T_1}} = 1.749 \cdot 10^{-4}.$$

С учетом перенапряжений

$$\chi_{01j} = \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T_1} \cdot \beta \cdot (\eta \cdot E_j);$$

$$\phi \chi_{01j} = \sqrt{1 - 2 \cdot \chi_{01j}} - \chi_{01j} \cdot \ln \left(\frac{1}{\chi_{01j}} + \frac{1}{\chi_{01j}} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot \chi_{01j}} - 1 \right) = 0.594;$$

$$q_{01j} = \frac{1}{\tau_0} \cdot e^{\frac{-D \cdot \phi \chi_{01j}}{2 \cdot K \cdot T_1}}.$$

$x_{01j} =$	$\phi x_{01j} =$	$\tau_{6j} =$	$q_{01j} =$	
0.192	0.38	$5.6824 \cdot 10^{-15}$	197.3025	
0.186	0.391	$2.4658 \cdot 10^{-14}$	95.9122	
0.181	0.402	$8.3917 \cdot 10^{-14}$	46.0732	
0.176	0.413	$2.2354 \cdot 10^{-13}$	21.865	
0.171	0.425	$4.6601 \cdot 10^{-13}$	10.2487	
0.166	0.437	$7.6043 \cdot 10^{-13}$	4.7433	
0.16	0.449	$9.7139 \cdot 10^{-13}$	2.167	
0.155	0.461	$9.7139 \cdot 10^{-13}$	0.9769	
0.15	0.474	$7.6043 \cdot 10^{-13}$	0.4345	
0.145	0.487	$4.6601 \cdot 10^{-13}$	0.1905	
0.14	0.499	$2.2354 \cdot 10^{-13}$	0.0824	
0.134	0.513	$8.3917 \cdot 10^{-14}$	0.0351	
0.129	0.526	$2.4658 \cdot 10^{-14}$	0.0147	
0.124	0.54	$5.6824 \cdot 10^{-15}$	0.0061	

$$S1 := \sum_{j=1}^{14} (q_{01j} \cdot \tau_{6j})$$

$$S1 = 2.412 \times 10^{-11}$$

При рабочей напряженности поля при температуре $T_2=303$

$$\chi_2 = \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T_2} \cdot \beta \cdot (\eta \cdot E_{\text{рабс}}) = 0.099;$$

$$\phi \chi_2 = \sqrt{1 - 2 \cdot \chi_2} - \chi_2 \cdot \ln \left(\frac{1}{\chi_2} + \frac{1}{\chi_2} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot \chi_2} - 1 \right) = 0.608;$$

$$q_2 = \frac{1}{\tau_0} \cdot e^{\frac{-D \cdot \phi \chi_2}{2 \cdot K \cdot T_2}} = 1.61 \cdot 10^{-3}.$$

С учетом перенапряжений

$$\chi_{02} = \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T_2} \cdot \beta \cdot (\eta \cdot E_j);$$

$$\phi \chi_{02j} = \sqrt{1 - 2 \cdot \chi_{02j}} - \chi_{02j} \cdot \ln \left(\frac{1}{\chi_{02j}} + \frac{1}{\chi_{02j}} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot \chi_{02j}} - 1 \right) = 0.594;$$

$$q_{02j} = \frac{1}{\tau_0} \cdot e^{\frac{-D \cdot \phi \chi_{02j}}{2 \cdot K \cdot T_2}}.$$

$x_{02j} =$	$\phi x_{02j} =$	$\tau_{6j} =$	$q_{02j} =$	
0.183	0.3989	$5.6824 \cdot 10^{-15}$	438.671	
0.178	0.4098	$2.4658 \cdot 10^{-14}$	228.7888	
0.173	0.4209	$8.3917 \cdot 10^{-14}$	118.102	
0.168	0.4321	$2.2354 \cdot 10^{-13}$	60.3273	
0.163	0.4435	$4.6601 \cdot 10^{-13}$	30.4862	
0.158	0.4551	$7.6043 \cdot 10^{-13}$	15.2377	
0.153	0.4669	$9.7139 \cdot 10^{-13}$	7.5309	
0.148	0.4789	$9.7139 \cdot 10^{-13}$	3.6793	
0.143	0.491	$7.6043 \cdot 10^{-13}$	1.7764	
0.138	0.5034	$4.6601 \cdot 10^{-13}$	0.8473	
0.133	0.516	$2.2354 \cdot 10^{-13}$	0.3991	
0.128	0.5288	$8.3917 \cdot 10^{-14}$	0.1856	
0.123	0.5419	$2.4658 \cdot 10^{-14}$	0.0852	
0.118	0.5551	$5.6824 \cdot 10^{-15}$	0.0385	

$$S2 := \sum_{j=1}^{14} (q_{02j} \cdot \tau_{6j})$$

$$S2 = 7.007 \times 10^{-11}$$

При рабочей напряженности поля при температуре $T_3=326$

$$\chi_3 = \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T_3} \cdot \beta \cdot (\eta \cdot E_{\text{рабс}}) = 0.095;$$

$$\phi \chi_3 = \sqrt{1 - 2 \cdot \chi_3} - \chi_3 \cdot \ln \left(\frac{1}{\chi_3} + \frac{1}{\chi_3} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot \chi_3} - 1 \right) = 0.621;$$

$$q_3 = \frac{1}{\tau_0} \cdot e^{\frac{-D \cdot \phi \chi_3}{2 \cdot K \cdot T_3}} = 0.01.$$

С учетом перенапряжений

$$\chi_{03} = \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T_3} \cdot \beta \cdot (\eta \cdot E_j);$$

$$\phi \chi_{03j} = \sqrt{1 - 2 \cdot \chi_{03j}} - \chi_{03j} \cdot \ln \left(\frac{1}{\chi_{03j}} + \frac{1}{\chi_{03j}} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot \chi_{03j}} - 1 \right) = 0.594;$$

$$q_{03j} = \frac{1}{\tau_0} \cdot e^{\frac{-D \cdot \phi \chi_{03j}}{2 \cdot K \cdot T_3}}.$$

$x_{03j} =$	$\phi_{x03j} =$	$\tau_{6j} =$	$q_{03j} =$	
0.174	0.417	$5.6824 \cdot 10^{-15}$	862.0629	
0.17	0.4277	$2.4658 \cdot 10^{-14}$	476.5024	
0.165	0.4385	$8.3917 \cdot 10^{-14}$	261.0171	
0.16	0.4495	$2.2354 \cdot 10^{-13}$	141.6662	
0.155	0.4607	$4.6601 \cdot 10^{-13}$	76.1672	
0.151	0.472	$7.6043 \cdot 10^{-13}$	40.5581	
0.146	0.4835	$9.7139 \cdot 10^{-13}$	21.3842	
0.141	0.4952	$9.7139 \cdot 10^{-13}$	11.1611	
0.136	0.5071	$7.6043 \cdot 10^{-13}$	5.765	
0.132	0.5192	$4.6601 \cdot 10^{-13}$	2.9461	
0.127	0.5315	$2.2354 \cdot 10^{-13}$	1.489	
0.122	0.544	$8.3917 \cdot 10^{-14}$	0.7441	
0.118	0.5567	$2.4658 \cdot 10^{-14}$	0.3675	
0.113	0.5696	$5.6824 \cdot 10^{-15}$	0.1793	

$$S_3 := \sum_{j=1}^{14} (q_{03j} \cdot \tau_{6j})$$

$$S_3 = 1.743 \times 10^{-10}$$

При рабочей напряженности поля при температуре $T_4=350$ °C

$$\chi_4 = \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T_4} \cdot \beta \cdot (\eta \cdot E_{\text{рабс}}) = 0.09;$$

$$\phi \chi_4 = \sqrt{1 - 2 \cdot \chi_4} - \chi_4 \cdot \ln \left(\frac{1}{\chi_4} + \frac{1}{\chi_4} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot \chi_4} - 1 \right) = 0.634;$$

$$q_4 = \frac{1}{\tau_0} \cdot e^{\frac{-D \cdot \phi \chi_4}{2 \cdot K \cdot T_4}} = 0.0055.$$

С учётом перенапряжений.

$$\chi_{04} = \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T_4} \cdot \beta \cdot (\eta \cdot E_j);$$

$$\phi \chi_{04j} = \sqrt{1 - 2 \cdot \chi_{04j}} - \chi_{04j} \cdot \ln \left(\frac{1}{\chi_{04j}} + \frac{1}{\chi_{04j}} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot \chi_{04j}} - 1 \right);$$

$$q_{04j} = \frac{1}{\tau_0} \cdot e^{\frac{-D \cdot \phi \chi_{04j}}{2 \cdot K \cdot T_4}}.$$

$x_{04j} =$	$\phi x_{04j} =$	$\tau_{6j} =$	$q_{04j} =$
0.166	0.4355	$5.6824 \cdot 10^{-15}$	1619.585
0.162	0.446	$2.4658 \cdot 10^{-14}$	943.7374
0.157	0.4566	$8.3917 \cdot 10^{-14}$	545.5789
0.153	0.4673	$2.2354 \cdot 10^{-13}$	312.8582
0.148	0.4782	$4.6601 \cdot 10^{-13}$	177.9265
0.144	0.4893	$7.6043 \cdot 10^{-13}$	100.3347
0.139	0.5005	$9.7139 \cdot 10^{-13}$	56.0903
0.135	0.5119	$9.7139 \cdot 10^{-13}$	31.0779
0.13	0.5235	$7.6043 \cdot 10^{-13}$	17.0624
0.126	0.5353	$4.6601 \cdot 10^{-13}$	9.2797
0.121	0.5472	$2.2354 \cdot 10^{-13}$	4.9983
0.117	0.5594	$8.3917 \cdot 10^{-14}$	2.6654
0.112	0.5717	$2.4658 \cdot 10^{-14}$	1.4068
0.108	0.5843	$5.6824 \cdot 10^{-15}$	0.7346

$$S_4 := \sum_{j=1}^{14} (q_{04j} \cdot \tau_{6j})$$

$$S_4 = 4.108 \times 10^{-10}$$

Найдем время до отказа.

$$q_0 = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{pmatrix}; S = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{pmatrix};$$

$$q_0 = \begin{pmatrix} 1.749 \cdot 10^{-4} \\ 0.0016 \\ 0.0102 \\ 0.0547 \end{pmatrix}; S = \begin{pmatrix} 2.4118 \cdot 10^{-11} \\ 7.0067 \cdot 10^{-11} \\ 1.7433 \cdot 10^{-11} \end{pmatrix}$$

$$\tau_{\text{сл}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^4 \left[\frac{\tau_i}{\tau_r} \cdot (q_0 + S) \right]} = 16.691 \text{ года}$$

где τ_i – продолжительность периода с соответствующей температурой;

τ_r - продолжительность года (365 дней);

q_0 – вероятность разрыва химической связи при воздействии Ераб;

S – вероятность разрыва химической связи с учетом воздействия перенапряжения.

По результатам расчетов была составлена таблица 8, в которой приведены критерии, по которым будет определяться наиболее оптимальная конструкция конденсатора. Вариант расчета электротермического конденсатора с бумажно-масляной изоляцией представлен в Приложение 1.

Таблица 8 – Результаты расчетов

Вариант	$T_{\max}$, °C	Габариты, м	Срок службы, год	$E_{\text{раб}}$, МВ/м	$C_{\text{уд}}$, Ф/м ³
Комбинированная бумажно-пленочная изоляция с выступающей фольгой	80	$H = 0,381$ $B = 0,121$ $L = 0,438$	16	18,65	0,11
Комбинированная бумажно-пленочная изоляция со скрытой фольгой	104	$H = 0,381$ $B = 0,121$ $L = 0,477$	8	18,65	0,11
Бумажно-масляная изоляция	118	$H = 0,381$ $B = 0,121$ $L = 0,931$	9	8,2	0,14

По результатам этой таблице можно сделать вывод, что выбранный ранее конденсатор с комбинированной бумажно-пленочной изоляцией с выступающей фольгой удовлетворяет всем требованиям, и в сравнении с конденсаторами с другими видами изоляции является наиболее лучшим.

Заключение

В результате выполнения данной бакалаврской работы были решены все поставленные задачи.

В результате расчета внутренней изоляции секций, было выполнено условие, что рабочая напряженность должна быть меньше допустимой напряженности и напряженности начала ионизации.

При расчете величины емкости секций учитывалась зависимость емкости от размеров секций, толщины изоляции и диэлектрической проницаемости выбранного материала. В зависимости от емкости секций изменяется количество параллельных и последовательных секций.

Тепловой расчет осуществлялся согласно схеме движения теплового потока. Производился расчет потерь в секции и обкладках. Температуроперепад в воздухе рассчитывался с использованием критериев теплового подобия: Нуссельта, Грасгоффа, Прандтля.

На основании проведенных расчетов, был построен график тепловой устойчивости, согласно которому для всех выбранных вариантов конструкции секции и используемых электроизоляционных материалов выполняется условие тепловой устойчивости, т.е. максимальная температура в конденсаторе не превышает допустимые температуры для выбранных материалов, согласно класса нагревостойкости.

Оценка срока службы конденсатора производилась на основе термофлуктуационной теории, согласно которой разрушение материала происходит из-за разрыва химической связи за счет тепловых флуктуаций атомов и молекул с учетом воздействия приложенного напряжения, перенапряжений и др. нагрузок.

После проведения всех расчетов была составлена таблица результатов, по итогам которой был выбран оптимальный вариант конденсатора, а именно

конденсатор с бумажно–пленочной изоляцией в исполнении с выступающей фольгой, т.к. этот вариант удовлетворяет всем требованиям.

На основании расчётов конденсатора с бумажно–пленочной изоляцией в исполнении с выступающей фольгой, была выбрана горизонтальная компоновка, т.к. при таком виде конструкции секций габаритные размеры конденсатора получаются меньше, чем при вертикальной компоновке. Так же при выборе основывались на сравнении тепловой устойчивости. При максимальной температуре окружающей среды 40°C , максимальная температура конденсатора равна 80°C .

Проведя расчёт водяного охлаждения для конденсатора с бумажно-масляной изоляцией, выяснили, что для данного конденсатора водяное охлаждение будет целесообразным, т.к. температура внутри конденсатора при максимальной температуре окружающей среды станет меньше, чем без применения данного охлаждения, но т.к. характеристики конденсатора с комбинированной изоляцией являются наиболее оптимальны и габаритные размеры его меньше, остановились на выборе данного конденсатора.

В работе также была произведена оценка срока службы работы. Было найдено время жизни конденсатора, оно оказалось достаточно большим только в выбранном ранее варианте.

Можно сделать вывод, что конденсатор с бумажно – пленочной изоляцией в исполнении с выступающей фольгой будет наиболее оптимальным.