

Реферат

Выпускная квалификационная работа объемом ???с., содержит 9 рисунков, 29 таблиц, 29 используемых источников, 3 приложения.

Ключевые слова: импульсный конденсатор.

Актуальность работы заключается в том, что высоковольтные импульсные конденсаторы применяют в настоящее время в различных отраслях науки и техники. Их широко используют для испытания высоковольтных трансформаторов, кабелей, внешней изоляции ЛЭП. Установки с импульсными конденсаторами используют для некоторых электротехнологических целей – магнитной штамповки, дробления твердых пород, сейсмической разведки. На данный момент импульсные конденсаторы выполняют с различной изоляцией и на различное напряжение. Высоковольтные импульсные конденсаторы в большинстве случаев выполняют на основе пленочной или бумажно-пленочной изоляцией, в связи с тем, что синтетические полимерные пленки обладают высокой электрической прочностью, позволяющей снизить общую толщину конденсаторного диэлектрика и улучшить экологичность конденсатора. В связи с этим разработка оптимальной конструкции импульсного конденсатора является актуальной задачей и имеет не только научный, но и практический интерес.

Структура работы: был проведен расчет импульсного конденсатора с пленочной, бумажно-пленочной изоляциями. По результатам расчетов была выбрана наиболее оптимальная конструкция импульсного конденсатора.

Аннотация

В работе производится расчет импульсного конденсатора с различными видами изоляции. По итогам расчетов осуществляется выбор наиболее оптимального варианта конструкции импульсного конденсатора.

Цель работы: выбор проходного изолятора, определение размеров и типа секций, выбор рабочей напряженности электрического поля и толщины изоляции между обкладками, проведение электрического и теплового расчета из условий тепловой устойчивости.

Анализ экологичности применяемых материалов для изготовления конденсаторов позволил выбрать наиболее безопасные диэлектрические материалы при техническом проектировании.

Анализ экономичности позволил выбрать оптимальные значения плотности и толщины диэлектрических материалов, что позволит снизить стоимость и габариты конденсатора.

Содержание

Введение.....	5
Литературный обзор	7
Апериодический и колебательный импульс	8
1 Общая часть	10
1.1 Конструкция импульсных конденсаторов.....	10
1.2 Особенности работы конденсатора	12
Преимущества конденсатора:	12
Эксплуатационные факторы и их воздействие на конденсаторы....	12
1.3 Климатические условия.....	13
1.4 Характеристики используемых материалов.....	15
1.4.1 Конденсаторная бумага	15
1.4.2 Полиэтилентерефталатная пленка.....	16
1.4.3 Поликарбонатная пленка.....	17
1.4.4 Касторовое масло	17
1.4.5 Сталь.....	18
1.4.6 Алюминиевая фольга.....	18
1.4.7 Высоковольтный фарфор	18
2 Специальная часть. Расчет импульсного конденсатора с пленочной изоляция на напряжение 70 кВ.....	19
2.1 Электрический расчет.....	19
2.1.1 Расчет наружной изоляции	19
2.1.2 Расчет внутренней изоляции.....	21
2.1.3 Расчет емкости секций.....	23
2.2 Тепловой расчет	26

2.3 Расчет срока службы.....	37
2.4 Конструктивные расчеты	45
Приложение 1. Расчет импульсного конденсатора с пленочной изоляцией на напряжение 70 кВ.....	48
Приложение 2. Расчет импульсного конденсатора с бумажно-пленочной изоляцией на напряжение 70 кВ.....	68

Введение

Конденсаторостроение – это важная отрасль народного хозяйства, удовлетворяющая широкие потребности разных видов промышленности, будь то электроэнергетика, электротехническая и радиоэлектронная промышленности в различных видах конденсаторов. Область использования конденсаторов довольно обширна. Это силовые (косинусные), электротермические и высоковольтные конденсаторы, конденсаторы связи, автомобильные, телефонные, конденсаторы, применяемые в электроэнергетике.

Высоковольтные импульсные конденсаторы применяются в настоящее время во многих отраслях науки и техники. Их широко используют в установках для высоковольтных импульсных испытаний силовых трансформаторах, аппаратах, кабелей и внешней изоляции ЛЭП. Конденсаторы обеспечивают высокие значения импульсного тока за счет меньшего внутреннего сопротивления (индуктивности) и значительно большую мощность на импульсе [3].

Импульсные конденсаторы работают в режиме заряд-разряд. Электрическая энергия, в процессе заряда накопленная в конденсаторе, используется для получения мощных кратковременных импульсов тока и напряжения большой амплитуды, поэтому данные конденсаторы широко используются в электрофизических установках, для высоковольтных импульсных испытаний электрооборудования.

Существующие на данный момент импульсные конденсаторы выполняются с различной изоляцией и на различное напряжение. Но они обладают рядом недостатков, основными из которых являются значительная масса и объем.

В связи с этим возникает вопрос оптимизации конструкции конденсатора.

Для решения поставленных задач планируется выполнить расчет различных видов изоляции конденсатора, а именно:

- с пленочной изоляцией;
- с бумажно-пленочной изоляцией.

Литературный обзор

Конденсаторы впервые появились в середине XVIII века, более 200 лет назад. Первоочередность изобретения конденсаторов приписывается Ван Мушенброку, профессору Лейденского университета (Нидерланды). Однако, более правильно считать изобретателем конденсаторов Эвальда Георга фон Клейста (Германия), заявившего об изобретении конденсатора в 1745 г.

Первые сведения об использовании конденсаторов в России относят к исследованиям атмосферного электричества Рихтером и Ломоносовым в 1752 г. Начало технического применения конденсаторов относят к середине XIX века, в 1856 г. патент был выдан Исхаму Багесу на использование конденсаторов для цепей телеграфирования и зажигания неоновых ламп. Сейчас трудно назвать область техники, где бы не использовались конденсаторы.

Максимальный спрос на потребления конденсаторов произошел в радиотехнике после открытия радио изобретателем Поповым в 1895 г. Вторым важным этапом в развитии конденсаторостроения стало их использование в разных областях энергетики и электротехники. В 1919 г. был запущен первый массовый выпуск слюдяных конденсаторов «Дженерал-Электрик корпорэйтед», а в 1926 г. был выпущен первый силовой конденсатор, с изоляцией из синтетической пленки (Германия). В России первый выпуск конденсаторов с бумажно-масляной изоляцией был начат центральной радиолaborаторией города Горького в 1931 г., а выпуск силовых конденсаторов «Московским трансформаторным заводом» в 1935 г. И только через десятилетие, в 1944 г. был построен первый специализированный конденсаторный завод в г. Серпухове, на котором выпускали силовые конденсаторы.

Конденсаторостроение является собой важную отрасль народного хозяйства, которая удовлетворяет широкие потребности электроэнергетики, электротехнической и радиоэлектронной промышленности в различных видах конденсаторов. В настоящее время область применения конденсаторов очень обширна. Это силовые (косинусные), электротермические и высоко-

вольтные конденсаторы, конденсаторы связи, автомобильные, телефонные, применяемые в электроэнергетике. В электротехнике и радиоэлектронике широко применяются различные виды электролитических, слюдяных, бумажных, керамических и стеклокерамических конденсаторов. Конденсаторы являются важным элементом интегральных схем, применяемых в вычислительной технике.

Импульсные конденсаторы выпускают на напряжение от 250 В до 200 кВ с энергией заряда до нескольких тысяч джоулей в единице для работы при аperiodическом или колебательном разряде с частотой следования импульсов от одного в минуту до сотен герц.

Существуют различные конструктивные формы импульсных конденсаторов в зависимости от области применения и режимов работы.

Аperiodический и колебательный импульс

Аperiodический импульс – это импульс, форма которого может быть описана суммой двух экспоненциальных функций (рис. 1).

Колебательный импульс – это импульс, который представляет собой затухающие колебания значения напряжений около нулевого значения или около другой составляющей (рис. 2, а и б соответственно).

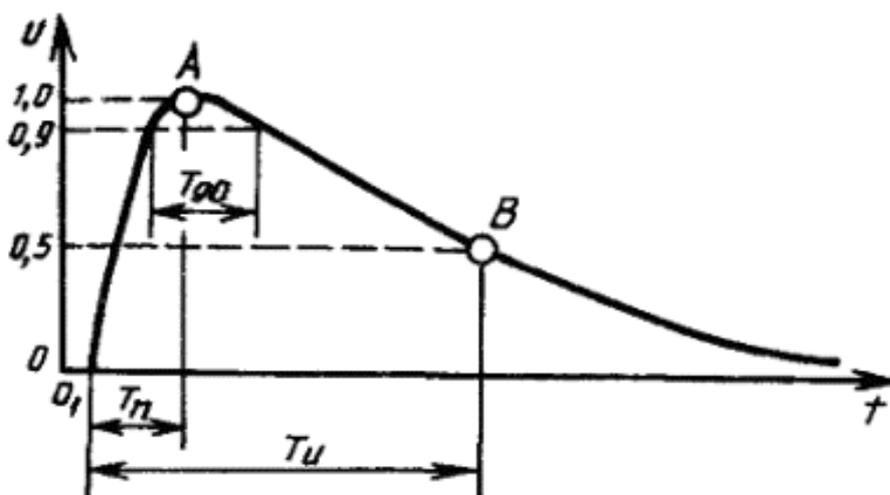


Рисунок 1 – Аperiodический импульс

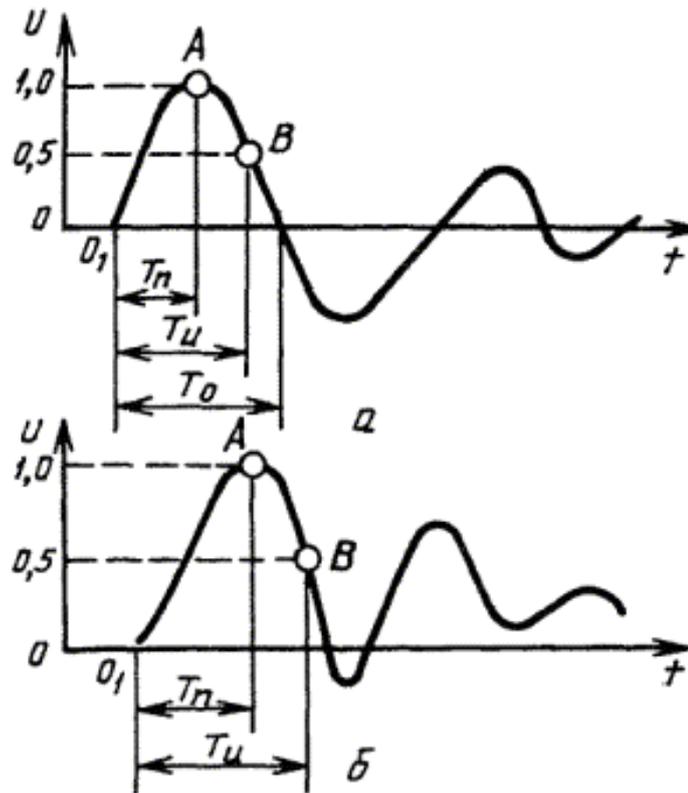


Рисунок 2 – Колебательный импульс

За значение испытательного напряжения U принимают максимальное значение напряжения импульса, если разряд произошел на максимуме напряжения и за ним, и значение напряжения в момент разряда (среза), если разряд произошел на подъеме напряжения (фронте).

Значение времени подъема импульса T_n определяется как интервал времени между моментами, когда напряжение равно нулю (начало импульса O_1) и когда оно достигнет своего максимального значения A .

Значение длительности импульса T_n (время до полуспада) определяют как интервал времени между началом импульса O_1 и моментом, когда значение напряжения понизилось до половины максимального значения [5].

Форма импульса может меняться в зависимости от области применения конденсатора.

1 Общая часть

1.1 Конструкция импульсных конденсаторов

Высоковольтный импульсный конденсатор содержит металлический корпус с крышками. Внутри корпуса размещены пропитанные конденсаторные секции, помещенные в жидкий диэлектрик, и токовыводы.

Импульсные конденсаторы выполняются в основном прямоугольной формы в металлических и изоляционных корпусах. Изоляционные корпуса применяют для конденсаторов на напряжение свыше 100 кВ. Материалы для изготовления изоляционных корпусов – пластмассы (полипропилен, полиамидные смолы).

При высоких значениях импульсов тока в конденсаторе возникают значительные электродинамические усилия, которые могут вызвать механическое разрушение диэлектрика. Поэтому в конструкциях импульсных конденсаторов в отличие от других типов особое внимание уделяется механической устойчивости всех токоведущих частей.

С этой целью соединительные шины и токоотводы секций делают более массивными и предъявляют высокие требования к надежности сварных и паяных соединений.

Если необходимо получить импульсы тока высокой амплитуды (сотни килоампер), конденсаторы должны обладать малой собственной индуктивностью. Это вызывается тем, что на собственную индуктивность конденсатора L в начале импульса ответвляется энергия $LI/2$, которая хотя и не теряется (поскольку при дальнейшем течении разряда она создает дополнительный ток), но уменьшает амплитуду импульсного тока и скорость его нарастания. Величина собственной индуктивности конденсатора в целом определяется индуктивностью его отдельных элементов: секций, внутренних соединений и выводов.

Индуктивность секций определяется ее геометрическими размерами, размерами токоотводов и их расположением. Снижение индуктивности до-

стигается уменьшением толщины и ширины секций, а также расположением токоотводов с одного торца, друг против друга посередине длины обкладок. Индуктивность уменьшается и при увеличении количества токоотводов и их ширины. Поэтому для получения большой емкости секций целесообразно применять широкую фольгу и бумагу.

Для снижения индуктивности конденсатора секции в пакетах необходимо соединять параллельно. Последовательное соединение увеличивает индуктивность пропорционально числу секций (групп секций). Кроме того, применяемые в конденсаторах предохранители для отключения секций при их пробое затрудняют получение малой индуктивности конденсаторов. Для значительного снижения индуктивности конденсаторов служат мало индуктивные выводы, которые выполняют в виде плоских шин, разделенных тонкой изоляционной перегородкой или коаксиально.

Напряжение к пакету, находящемуся в герметично закрытом корпусе, 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. Сверху к изолятору припаивается металлический колпачок, служащий для присоединения конденсатора к внешней сети. Герметизация переходного соединения металл – фарфор возможна также с помощью резины.

Недостатком обычно применяемых выводов является их значительная индуктивность. Для ее снижения в импульсных конденсаторах применяются специальные конструкции выводов.

1.2 Особенности работы конденсатора

Высоковольтные импульсные конденсаторы работают в режиме заряд-разряд, и, наряду с высокой электрической прочностью и сравнительно большими емкостями должны допускать быстрые разряды, т. е. пропускать большие токи. Следовательно, их собственная индуктивность должна быть малой, чтобы не исказить формы импульсов.

Преимущества конденсатора:

- малое внутреннее сопротивление;
- плотность энергии в 10 раз больше, чем у обычного конденсатора;
- возможность длительного хранения заряда в течении сотен часов;
- устойчивость к кратковременным воздействиям высоких напряжений и токов короткого замыкания;
- большой срок службы;
- не содержит токсичных веществ.

1.3 Эксплуатационные факторы и их воздействие на конденсаторы

Эксплуатационная надежность конденсаторов в аппаратуре в большинстве своем определяется действием комплекса факторов, которые по своей природе разделяются на следующие группы:

- электрические нагрузки (напряжение, ток, реактивная мощность, частота переменного тока);
- климатические нагрузки (температура и влажность окружающей среды, атмосферное давление, биологические факторы и т. д.)
- механические нагрузки (вибрация, удары, постоянно действующее ускорение, акустические шумы);
- радиационные воздействия (поток нейтронов, гамма-лучи, солнечная радиация и др.).

Под воздействием данных факторов изменяются параметры конденсаторов. В зависимости от вида и длительности нагрузки уходы параметров складываются из обратимых (временных) и необратимых изменений.

Обратимые изменения параметров вызваны кратковременным воздействием нагрузок, которые не приводят к изменению свойств конструкционных материалов и которые проявляются только при условии воздействия нагрузок. После снятия нагрузки параметры конденсаторов, принимают значения, близкие к начальным.

1.4 Климатические условия

Температура и влажность окружающей среды являются важнейшими факторами, влияющими на надежность, долговечность и сохраняемость конденсаторов. Длительное воздействие повышенной температуры вызывает старение диэлектрика, в результате чего параметры конденсаторов претерпевают необратимые изменения. Предельно допустимая температура для конденсаторов ограничивается заданием максимальной положительной температуры окружающей среды и величиной электрической нагрузки. Применение конденсаторов в условиях, превышающих эти ограничения, недопустимо, так как может вызвать резкое ухудшение параметров (снижение сопротивления изоляции и электрической прочности, уменьшение емкости, увеличение тока и тангенса угла потерь), нарушение герметичности спаев, ухудшение изоляционных и защитных свойств органических покрытий и заливочных материалов, а в ряде случаев может привести к полной потере работоспособности конденсаторов.

Наряду с внешней температурой на конденсаторы в составе аппаратуры может дополнительно воздействовать теплота, выделяемая другими сильно нагревающимися при работе аппаратуры изделиями (мощные генераторные и модуляторные лампы, резисторы и т. п.).

Тепловое воздействие на конденсаторы может быть как непрерывным, так и периодически изменяющимся. Резкое изменение температуры может

вызвать механические напряжения в разнородных материалах, нарушение герметичности паяных соединений, появление трещин, зазоров в деталях конденсаторов.

При эксплуатации конденсаторов в условиях сверхнизких температур (до минус 180°C) за счет повышения хрупкости ряда конструкционных материалов возможно ухудшение механической прочности конденсаторов.

Конденсаторы не подвергаются непосредственному воздействию солнечной радиации, атмосферных осадков, песка и пыли. Однако пыль и песок способствуют коррозии металлических деталей и развитию плесени, а попадая в зазоры между трущимися частями подстроечных конденсаторов, ускоряют их износ.

Повышенное (до 3 атм) давление не оказывает существенного влияния на работу конденсаторов. В условиях низкого давления снижается электрическая прочность воздушного промежутка и создаются условия для пробоев и перекрытия.

Для предотвращения пробоев и перекрытия при пониженном атмосферном давлении необходимо снижать напряжение на конденсаторе. Кроме того, при пониженном атмосферном давлении ухудшается отвод теплоты от конденсатора, а в условиях глубокого вакуума (давление менее $1,3\text{--}106\text{ Па}$) возможна сублимация (испарение) твердых материалов. В условиях низкого давления у негерметичных оксидных конденсаторов с жидким или пастообразным электролитом за счет испарения легко летучих компонентов происходит интенсивная потеря электролита, что резко снижает срок их службы. Ухудшение механической прочности и эластичности органических материалов узла уплотнения за счет сублимации увеличивает скорость потери электролита [6].

1.5 Характеристики используемых материалов

В импульсных конденсаторах, как и в большинстве электротехнических устройств используются электроизоляционные, проводниковые (например, фольга), а также конструкционные материалы.

Для производства импульсных конденсаторов в основном применяют бумагу, пленочные диэлектрики, такие как полипропилен, лавсан и другие.

Основными характеристиками диэлектрика конденсаторов являются пробивная напряженность $E_{пр}$, диэлектрическая проницаемость ϵ и тангенс угла диэлектрических потерь ($tg\delta$) на рабочей частоте конденсатора. Величины $E_{пр}$ и ϵ определяют удельную энергию конденсатора, а $tg\delta$ – тепловой режим конденсатора, особенно существенный для часто повторяющихся колебательных импульсов.

Для создания тонких слоев диэлектрика между обкладками фольги применяется конденсаторная бумага или пленочные изоляционные материалы, высушенные и пропитанные жидким диэлектриком. Пропитка увеличивает электрическую прочность изоляции и повышает напряжение начала частичных разрядов.

1.5.1 Конденсаторная бумага

Этот вид электротехнической бумаги отличается от других весьма малой толщиной и высокой плотностью. Промышленность выпускает различные типы конденсаторной бумаги, различающейся плотностью, толщиной листа, электрической прочностью, значениями тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$ и характером его зависимости от температуры, гладкостью, влажностью. Плотности бумаг 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 [2].

Назначение и основные качества бумаги отражаются в ее основном обозначении – КОН, дополнительные – добавкой к нему других букв. По ГОСТ 1908–82 изготавливаются следующие типы бумаги: обычная (КОН), специальная улучшенного качества (СКОН), с малыми диэлектрическими потерями (МКОН), с малыми диэлектрическими потерями и высокой электрической прочностью (ЭМКОН) и особо низкими диэлектрическими 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} , °С	λ , Вт/м·град	ϵ
		20 °С	80 °С				
10	1000	0,0016	0,0023	250	100	0,18	3,86

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

1.5.2 Полиэтилентерефталатная пленка

Этот вид пленки относится к полярным синтетическим пленкам. В отличие от неполярных она обладает более высокой величиной диэлектрической проницаемости и большим значением тангенса угла диэлектрических потерь. Для полярных пленок характерно возрастание диэлектрической проницаемости с температурой, а зависимость тангенса угла от температуры может иметь релаксационный максимум [2].

Полиэтилентерефталатная пленка (ПЭТФ) применяется для изоляции обмоток электрических машин, в кабельной и конденсаторной технике в сочетании с волокнистыми материалами. Данная пленка стойка к воздействию органических растворов, соляной и азотной кислот, но разрушается при воздействии серной кислоты, фенола и крезолов.

Таблица 2 – Характеристики полиэтилентерефталатной пленки

ε	$\operatorname{tg}\delta \cdot 10^4$	λ , Вт/м·град	T_{\max} , °С	Толщина, мкм	Плотность, $\gamma \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	$E_{\text{пр}} \cdot 10^{-6}$, В/м
3.0÷3.2	30÷40	0.17÷0.22	130	10	1.39÷1.4	160÷240

1.5.3 Поликарбонатная пленка

Данный вид пленок так же относится к полярным синтетическим пленкам и обладает комплексом ценных свойств: высокой механической прочностью, повышенной устойчивостью к ударным нагрузкам, высоким электрическим сопротивлением и электрической прочностью, незначительными электрическими потерями, высокой теплоустойчивостью.

Таблица 3 – Характеристики поликарбонатной пленки

ε	$\operatorname{tg}\delta \cdot 10^4$	λ , Вт/м·град	T_{\max} , °С	Толщина, мкм	Плотность, $\gamma \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	$E_{\text{пр}} \cdot 10^{-6}$, В/м
2.8÷3.0	8÷12	0.17÷0.22	140	10	1.2÷1.3	150÷360

1.5.4 Касторовое масло

Стабильность работы конденсаторов определяется в основном свойствами пропитывающих жидкостей, их стойкость к газовыделению при воздействии частичных разрядов и способностью к газопоглощению [2].

Касторовое масло, широко используется в импульсных конденсаторах. Применение его предпочтительно, т.к. касторовое масло имеет большие значения $\varepsilon=4.2\div 4.7$ и, по сравнению с конденсаторным, является более стойки против разложения в электрическом поле.

Таблица 4 – Характеристики конденсаторного масла

ε	T_{\max} , °С	$\operatorname{tg}\delta$	λ , Вт/м·град
4.5	275	0,003	0,17

1.5.5 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 [4].

Таблица 5 – Характеристики стали Ст3сп

Коэффициент теплопроводности, Вт/м·град	Предел кратковременной прочности, МПа	Твердость по Бринеллю, МПа	Плотность, кг/м ³	Предел кратковременной прочности, МПа
70	450	131	7850	372

1.5.6 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 [4].

Таблица 6 – Характеристики алюминиевой фольги

Теплоемкость, Дж/(кг·°С)	λ , Вт/м·град
840	200

1.5.7 Высоковольтный фарфор

Таблица 7 – Характеристики высоковольтного фарфора

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

2 Специальная часть. Расчет импульсного конденсатора с пленочной изоляцией на напряжение 70 кВ

Исходные данные:

Номинальное напряжение	$U_n = 70 \text{ кВ}$
Реактивная мощность	$Q_p = 75000 \text{ Вар}$
Вероятность безотказной работы	$P(t) = 0.95$
Математическое ожидание	$U_m = 15 \text{ кВ}$
Среднеквадратичное отклонение	$\sigma = 1 \text{ кВ}$
Число перенапряжений в год	$N_n = 10000$
Длительность одного перенапряжения	$t_1 = 50 \cdot 10^{-6} \text{ с}$
Номинальная емкость	$C_n = 0,3 \text{ мкФ}$

В расчете выбрана полиэтилентерефталатная пленка, обладающая высокой механической прочностью и достаточно высоким значением диэлектрической проницаемости, что позволяет получить требуемую емкость при меньших габаритных размерах.

2.1 Электрический расчет

Основными этапами при проектировании конденсатора являются: выбор и проверка из условия перекрытия проходного изолятора, определение размеров и типа секций, выбор материала и рабочей напряженности электрического поля и толщины изоляции между обкладками, проведение электрического и теплового расчета из условия тепловой устойчивости, анализ надежности и долговечности.

Расчет наружной изоляции у всех вариантов расчета рассчитывается одинаково. Методика расчета взята из [1].

2.1.1 Расчет наружной изоляции

Исходя из технического задания (по заданному значению U_n) по ГОСТ 1516.1–76 [7] находим U_c – напряжение, выдерживаемое изолятором

при сухой и чистой и поверхности, $U_{дгост}$ – выдерживаемое напряжение под дождем, $U_{и}$ – импульсное выдерживаемое напряжение.

$$U_c=150 \text{ кВ} \quad U_{дгост}=120 \text{ кВ} \quad U_{и}=260 \text{ кВ} \quad U_n=70 \text{ кВ}$$

Выполним расчет наружной изоляции, принимая за расчетное напряжение:

$$U_0=1.1 \cdot U_c \quad U_0=165 \text{ кВ}$$

Для определения l используем эмпирические формулы:

$$l_B := \frac{1.1 \cdot U_c}{295} \quad l_B = 0.559 \text{ м}$$

$$l_D := \frac{U_c}{205} \quad l_D = 0.732 \text{ м}$$

$$l_{и} := \frac{U_{и}}{500} \quad l_{и} = 0.52 \text{ м}$$

Из трех найденных значений выбираем наибольшее, т.е. $l_D=0.732 \text{ м}$.

Находим длину масляной части изолятора:

$$l_M := \frac{U_0}{800} \quad l_M = 0.206 \text{ м}$$

Рассчитываем количество ребер и их размеры:

$$n_p := 1.5 + 0.065 \cdot U_n \quad n_p = 6.05$$

$$t_p := \frac{l_B}{n_p} \quad t_p = 0.093$$

$$a_p := 0.9 \cdot t_p \quad a_p = 0.113$$

Принимаем $n_p := 6$

Принимаем $t_p := 0.125 \text{ м}$

Принимаем $a_p := 0.12 \text{ м}$

Принимаем $a_{p1} := 0.13 \text{ м}$

По расчетным данным выбираем проходной изолятор типа ПНТ–10–250 [8].

Производим проверку изолятора из условия перекрытия под дождем:

$$U_{др} := \left(124 \cdot I_B^{0.77} + 42 \cdot n_p \cdot t_p^{0.6} \cdot \frac{ap1}{ap} \right)$$

$$U_{др} = 157.671 \text{ кВ} \quad U_{дгост} = 120 \text{ кВ}$$

Из сравнения видим, что найденное значение $U_{др}$ превышает $U_{дгост}$, т.е. выбор изолятора из условия перекрытия произведен правильно, следовательно, выполняются необходимые условия, и при работе не произойдет перекрытия.

2.1.2 Расчет внутренней изоляции

Расчет внутренней изоляции заключается в определении размеров и типа секций, толщины изоляции.

Из справочника [2] находим электрическую прочность полиэтилентерефталатной пленки $E_{пр}=150$ МВ/м. Для предварительных расчетов принимаем значение электрической прочности $E_{пр}=150$ МВ/м.

Определим значение допустимой рабочей напряженности $E_{рабд}$, принимаем значение коэффициента запаса k_1 от 1,1 до 1,6; коэффициента разброса электрической прочности k_2 от 1,2 до 2,2 и коэффициента изменения длительной электрической прочности k_3 от 1,3 до 2,5. Значения коэффициентов берут тем больше, чем больше частота переменного тока.

$$k_1 := 1.1 \quad k_2 := 1.2 \quad k_3 := 1.3$$

$$E_{рабд} := \frac{E_{пр}}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3} \quad E_{рабд} = 8.741 \times 10^7 \text{ В/м}$$

Изоляцию между обкладками выполним из 3 слоев полиэтилентерефталатной пленки толщиной 20 мкм.

$$n_1 := 3 \quad \delta_1 := 20 \cdot 10^{-6} \text{ м} \quad \epsilon_1 := 3.2$$

$$d := (n_1 \cdot \delta_1) \quad d = 6 \times 10^{-5} \text{ м}$$

Конденсатор собирается из отдельных секций, соединенных последовательно и параллельно. Количество последовательно соединенных секций выбираем из условия допустимой напряженности.

$$n_{\text{пос}} := \frac{U_n \cdot 1000}{E_{\text{рабд}} \cdot d} \quad n_{\text{пос}} = 13.347$$

Примем $n_{\text{пос}} := 13$

Определим рабочую напряженность электрического поля и значение напряжения, приходящегося на одну секцию.

$$U_c := \frac{U_n \cdot 1000}{8} \cdot \frac{0.78 \cdot \tau_1^2}{\tau_2^2} \quad U_c = 1.706 \times 10^3 \quad \text{- импульсное напряжение, приходящееся на одну секцию, В/м}$$

$$E_{\text{рабс}} := \frac{U_c}{n_{\text{пос}} \cdot (n_1 \cdot \delta_1)} \quad E_{\text{рабс}} = 2.188 \times 10^6 \quad \text{В} \quad E_{\text{рабд}} = 8.741 \times 10^7 \quad \text{В}$$

Рабочая напряженность должна быть меньше допустимой напряженности – условие выполняется. Т.к. мы имеем достаточно большой запас рабочей напряженности, то изоляцию между обкладками выполним из 2 слоев полиэтилентерефталатной пленки толщиной 20 мкм.

$$n_1 := 2 \quad \delta_1 := 20 \cdot 10^{-6} \quad \text{м} \quad \epsilon_1 := 3.2$$

$$d := (n_1 \cdot \delta_1) \quad d = 4 \times 10^{-5} \quad \text{м}$$

Тогда количество последовательно соединенных секций изменится.

$$n_{\text{пос}} := \frac{U_n \cdot 1000}{E_{\text{рабд}} \cdot d} \quad n_{\text{пос}} = 20.02$$

Примем значение меньше рассчитанного и проверим, выполнится ли условие, что рабочая напряженность меньше допустимой напряженности.

Примем $n_{\text{пос}} := 15$

Рабочая напряженность должна быть меньше допустимой напряженности – условие выполняется.

$$U_c := \frac{U_n \cdot 1000}{8} \cdot \frac{0.78 \cdot \tau_1^2}{\tau_2^2} \quad U_c = 1.706 \times 10^3 \quad \text{- импульсное напряжение, приходящееся на одну секцию, В/м}$$

$$E_{\text{рабс}} := \frac{U_c}{n_{\text{пос}} \cdot (n_1 \cdot \delta_1)} \quad E_{\text{рабс}} = 2.844 \times 10^6 \quad \text{В} \quad E_{\text{рабд}} = 8.741 \times 10^7 \quad \text{В}$$

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

$$E1 := \frac{Uc}{n1 \cdot \delta 1} \quad E1 = 4.266 \times 10^7 \text{ В/м} \quad E_{пр} = 1.5 \times 10^8 \text{ В/м}$$

$$E_{рабд} = 8.741 \times 10^7 \text{ В}$$

Из проведенных расчетов видно, что напряженности электрического поля E1 в пленочной изоляции не превышает значения электрической прочности Eпр и значение допустимой напряженности Eрабд.

Найдем испытательное напряжение секции и длину закраины.

$$U_{испс} := 2.2 \cdot Uc \quad U_{испс} = 3.754 \times 10^3 \text{ В}$$

$$k_{зак} := 1.5 \left(\frac{\text{мм}}{\text{кВ}} \right) \text{ - коэффициент закраины}$$

$$l_{тех} := 5 \text{ (мм) - допуск на технологическое смещение фольги}$$

$$\Delta l := k_{зак} \cdot U_{испс} + l_{тех} \quad \Delta l = 5.636 \times 10^3 \text{ (мм)} \quad \text{Примем } \Delta l := 2.6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Найдем толщину изоляции между секциями и от корпуса.

$$k1 := 1.1 \quad k2 := 1.2 \quad k3 := 1.3 \quad kп := 1.3$$

$$\Delta_{изс} := \frac{2U_{испс}}{E_{рабс}} \cdot k1 \quad \Delta_{изс} = 2.904 \times 10^{-3} \text{ м} \quad \text{Примем } \Delta_{изс} := 3.2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\Delta_{изк} := \frac{U_n \cdot 1000}{E_{пр}} \cdot k1 \cdot kп \quad \Delta_{изк} = 6.673 \times 10^{-4} \text{ м} \quad \text{Примем } \Delta_{изк} := 7 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

Изоляцию от корпуса выполняем из кабельной бумаги толщиной 120 мкм, т.к. изоляция от корпуса дополнительно несет механическую нагрузку, предотвращая задиры секции при сборке конденсатора, принимаем значения толщины изоляции между секциями и толщины изоляции от корпуса немного больше полученного.

2.1.3 Расчет емкости секций

Выполним расчет диэлектрической проницаемости пленочной изоляции, определив из справочной литературы [2] значения ϵ для полиэтилентерефталатной пленки.

$$\epsilon_{п} = 3.2 \quad \text{Диэлектрическая проницаемость лавсановой пленки}$$

В соответствии с прототипом [9] заданного конденсатора зададим размеры корпуса (высоту H , ширину B и длину L , зазор от крышки D), толщину стенок и выберем вертикальную компоновку расположения секций со скрытой фольгой. На рисунке 3 представлены размеры корпуса и вертикальная компоновка секций.

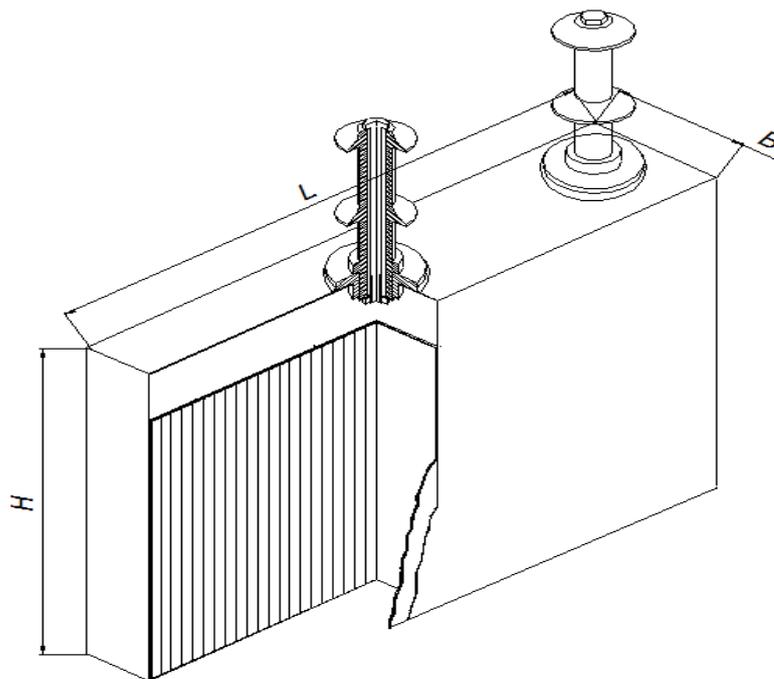


Рисунок 3 – корпус конденсатора

$$\begin{array}{lll}
 H := 0.3 \text{ [м]} & B := 0.16 \text{ м} & L := 0.3 \text{ м} \\
 \Delta_{\text{мет}} := 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ м} & \Delta := 0.06 \text{ м} & \Delta_{\text{с}} := 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}
 \end{array}$$

для секций со скрытой фольгой

$$\begin{array}{ll}
 b_{\text{сск}} := B - \Delta - 2\Delta_{\text{мет}} - 2\Delta_{\text{дизк}} & b_{\text{сск}} = 0.098 \text{ м} \\
 h_{\text{сск}} := H - 2 \cdot \Delta_{\text{мет}} - 2\Delta_{\text{дизк}} & h_{\text{сск}} = 0.298 \text{ м}
 \end{array}$$

Примем: $b_{\text{сск}} := 100 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ $h_{\text{сск}} := 300 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

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.

Емкость секций рассчитывается, задаваясь ее размерами (толщиной $\Delta_{\text{с}}$, шириной $b_{\text{с}}$ и высотой $h_{\text{с}}$, которые выбираются предварительно, опираясь на существующие прототипы конструкций).

$$k_3 := 0.9 \quad \Delta\phi := 12 \cdot 10^{-6} \text{ (м)} \quad \varepsilon_0 := 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{М}}$$

Путем подбора значения D_c сравняем величины $C_{с1}$ и $C_{с2}$

$$\Delta_{сск} := 5.1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

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

$$C_{сск1} = 1.512 \times 10^{-6} \text{ Ф}$$

Число параллельных секций

$$n_{пар} := \frac{C_{к-ппос}}{C_{сск1}} \quad n_{пар} = 2.976 \quad \text{Примем } n_{пар} := 3$$

$$C_{сск2} := C_{к-ппос} \cdot \frac{n_{пар}}{n_{пар}} \quad C_{сск2} = 1.5 \times 10^{-6} \text{ Ф} \quad \Delta_{сск} := 5.1 \times 10^{-3} \text{ м}$$

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

Размеры пакета

$$h_{пск} := h_{сск} + 2 \cdot \Delta_{изк} \quad h_{пск} = 0.301 \text{ м}$$

$$b_{пск} := b_{сск} + 2 \cdot \Delta_{изк} \quad b_{пск} = 0.101 \text{ м}$$

$$l_{пск} := n_{пар} \cdot n_{ппос} \cdot \Delta_{сск} + n_{пар} \cdot n_{ппос} \cdot \Delta_{изс} + 2 \cdot \Delta_{изк} \quad l_{пск} = 0.375 \text{ м}$$

Размеры корпуса

$$H_{кск} := b_{пск} + \Delta + 2 \cdot \Delta_{мет} \quad H_{кск} = 0.162 \text{ м}$$

$$B_{кск} := h_{пск} + 2 \cdot \Delta_{мет} \quad B_{кск} = 0.302 \text{ м}$$

$$L_{кск} := l_{пск} + 2 \cdot \Delta_{мет} \quad L_{кск} = 0.376 \text{ м}$$

Сравним полученные данные всех трех вариантов. Для удобства сведем в таблицу 8.

Таблица 8 – Результаты электрического расчета

Вариант	$E_{пр}, \text{ В/м} \cdot 10^6$	$E_{рабс}, \text{ В/м} \cdot 10^6$	ппос	ппар	ε_p	$\varepsilon_{бп}$	ε_k	Высота Н, м	Ширина В, м	Длина L, м
Пленочная изоляция (лавсан)	150	2.844	15	3	3.2	–	–	0.162	0.302	0.376
Пленочная изоляция (поликарбонат)	150	2.844	15	3	3.0	–	–	0.162	0.302	0.397
Бумажно-пленочная изоляция	95	1.422	15	40	3.2	3.3	6.6	0.167	0.307	6.595

Из таблицы видно, что пленочная изоляция с полиэтилентерефталатной пленкой обладает наименьшими габаритными размерами при одинаковой рабочей напряженности со вторым вариантом. Конденсатор с бумажно-пленочной изоляцией обладает наибольшими габаритными размерами, т.к. средняя электрическая прочность данной изоляции мала, по сравнению с другими вариантами.

2.2 Тепловой расчет

Тепловой расчет конденсатора сводится к определению тепловыделения и температуроперепадов в отдельных слоях (участках) с последующим построением графика

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.

Зададим значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь пленки и пропитывающей жидкости при температуре 20°C , в качестве пропитывающей жидкости взято касторовое масло.

$\epsilon_{п} = 3.2$	Диэлектрическая проницаемость полиэтилентерефталатной пленки
$\operatorname{tg}\delta_{п} = 0.0003$	Тангенс угла диэлектрических потерь пленки
$\gamma_{п} = 1400$	Плотность пленки
$\epsilon_{ж} = 4.5$	Диэлектрическая проницаемость пропитывающей жидкости
$\operatorname{tg}\delta_{ж} = 0.001$	Тангенс угла диэлектрических потерь пропитывающей жидкости

Зададим значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь пленки и пропитывающей жидкости при температуре 80°C , в качестве пропитывающей жидкости взято касторовое масло.

$\epsilon_{п} = 3.2$	Диэлектрическая проницаемость полиэтилентерефталатной пленки
$\operatorname{Tg}\delta_{п} = 0.0005$	Тангенс угла диэлектрических потерь пленки
$\gamma_{п} = 1400$	Плотность пленки
$\epsilon_{ж} = 4.5$	Диэлектрическая проницаемость пропитывающей жидкости

$T_{гж} = 0.05$ Тангенс угла диэлектрических потерь пропитывающей жидкости

Для построения графика температурной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь пленочной изоляции определим постоянные коэффициенты a_m , $tg\delta_{0m}$, a_p и $tg\delta_{0p}$.

$$a_p := \frac{\ln(tg\delta_n) - \ln(tg\delta_{80})}{20 - 80} \quad a_p = 8.514 \times 10^{-3}$$

$$tg\delta_{0p} := \frac{tg\delta_{80}}{e^{a_p \cdot 80}} \quad tg\delta_{0p} = 1.518 \times 10^{-4}$$

$$tg\delta_{pn} := tg\delta_{0p} \cdot e^{a_p \cdot T1_n} \quad tg\delta_{pn} = 3 \times 10^{-4}$$

$$a_j := \frac{\ln(tg\delta_j) - \ln(tg\delta_{80})}{20 - 80} \quad a_j = 0.065$$

$$tg\delta_{0j} := \frac{tg\delta_{80}}{e^{a_j \cdot 80}} \quad tg\delta_{0j} = 5.429 \times 10^{-6}$$

$T1 :=$
 20
40
60
80
100
120
140
160
180
200

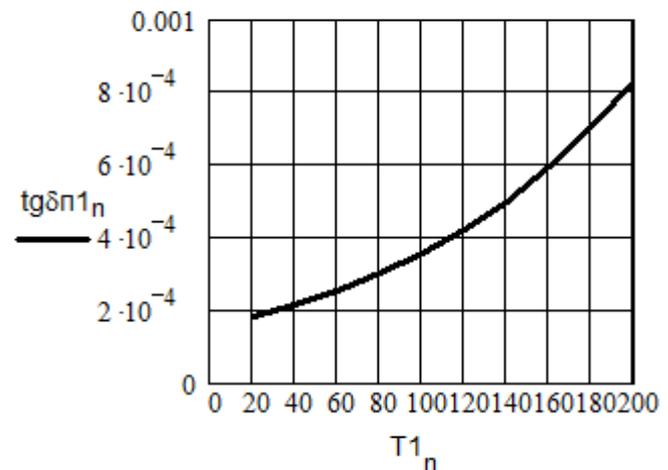
ORIGIN := 1
 $n := 1..10$
 $i := 0..10$

$$tg\delta_{jn} := tg\delta_{0j} \cdot e^{a_j \cdot T1_n}$$

$$tg\delta_{pn} := tg\delta_{0p} \cdot e^{a_p \cdot T1_n}$$

$$T1_n = tg\delta_{pn} =$$

20	$1.8 \cdot 10^{-4}$
40	$2.134 \cdot 10^{-4}$
60	$2.53 \cdot 10^{-4}$
80	$3 \cdot 10^{-4}$
100	$3.557 \cdot 10^{-4}$
120	$4.217 \cdot 10^{-4}$
140	$5 \cdot 10^{-4}$
160	$5.928 \cdot 10^{-4}$
180	$7.029 \cdot 10^{-4}$
200	$8.333 \cdot 10^{-4}$



В качестве изоляции взята только пленка, поэтому рассчитывать тангенс угла диэлектрических потерь с учетом объемных долей не имеет смысла.

Тепловой расчет проведем для секций со скрытой фольгой. Для проведения теплового расчета зададим четыре значения температуры в цен-

тральной точке секции (рис. 4). Приняли теплоотвод только в сторону боковых стенок корпуса.

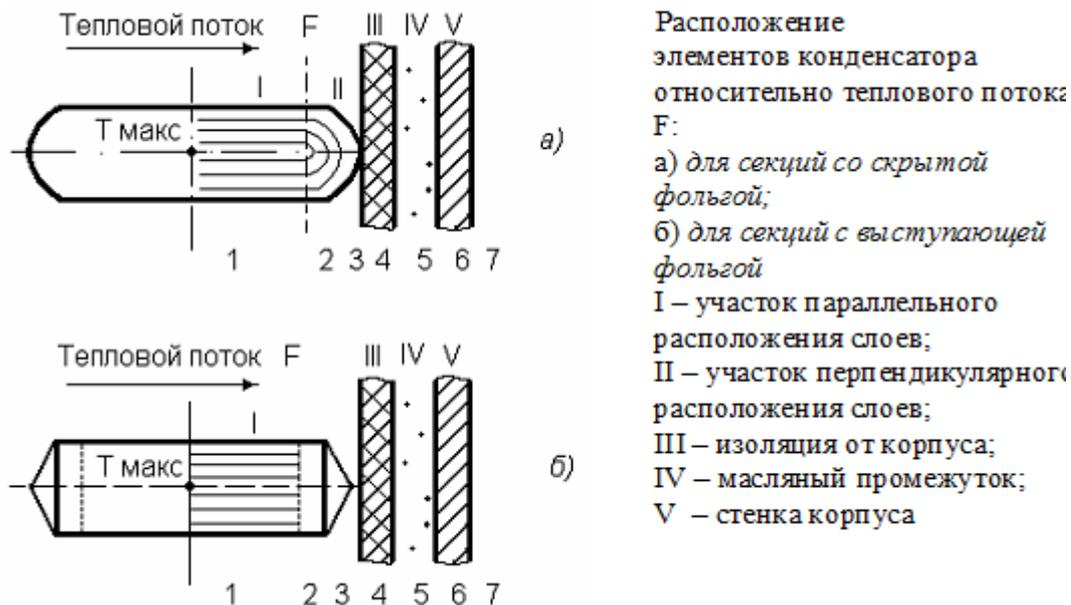


Рисунок 4 – Схема движения теплового потока конденсатора

Секции с выступающей фольгой обладают увеличенным весом фольги, за счет этого увеличатся габариты и вес конденсатора. Так же при такой конструкции между фольговыми обкладками остается пространство, не заполненное твердым диэлектриком, и при высоких напряжениях в этом пространстве возникают ионизационные процессы, приводящие к пробое конденсатора. Поэтому выбираем секции со скрытой фольгой.

$$T1 := \begin{pmatrix} 20 \\ 40 \\ 60 \\ 80 \end{pmatrix} \quad \begin{aligned} \text{tg}\delta_{пн} &:= \text{tg}\delta_{0п} \cdot e^{a_n \cdot T1} & C_c &:= C_{cск1} & \text{ORIGIN} &:= 1 \\ & & C_c &= 1.3 \times 10^{-6} & i &:= 1..4 \end{aligned}$$

Находим диэлектрические потери. Особенность расчета заключается в том, что для данного типа конденсаторов при нахождении диэлектрических потерь используются частота следования импульсов, ω .

$$\omega := \frac{2\pi}{\tau_1}$$

$$P_{\text{дск}} := \frac{U_c^2 \cdot \omega \cdot C_{\text{сск1}} \cdot \text{tg}\delta_{\text{пл}}}{8} \cdot \frac{0.78 \cdot \tau_1^2}{\tau_2^2} \quad P_{\text{дск}} = \begin{pmatrix} 0.024 \\ 0.029 \\ 0.034 \\ 0.04 \end{pmatrix}$$

Находим потери в обкладках, принимая:

$$T_0 := 20^\circ\text{C} \quad l_{\text{выст}} := 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\rho_0 := 28 \cdot 10^{-9} \text{ Ом м} \quad \alpha_{\rho\phi} := 0.0045 \text{ 1/град}$$

$$k_3 := 0.9$$

Активная длина обкладки:

$$L_{\text{аск}} := \frac{\Delta_{\text{сск}} \cdot k_3}{2 \cdot (d + \Delta\phi)} \cdot \left(h_{\text{сск}} - \Delta_{\text{сск}} + \frac{3.14}{4} \cdot \Delta_{\text{сск}} \cdot k_3 \right) \quad L_{\text{аск}} = 13.174 \text{ м}$$

Находим потери в обкладках:

$$n_{\text{ск}} := 1$$

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

$$P_{\text{фск}} = \begin{pmatrix} 0.583 \\ 0.635 \\ 0.688 \\ 0.74 \end{pmatrix} \text{ Вт}$$

Тепловыделения в секции:

3.2.4. Тепловыделение в секции

$$P_{\text{сск}} := P_{\text{дск}} + P_{\text{фск}} \quad P_{\text{сск}} = \begin{pmatrix} 0.607 \\ 0.664 \\ 0.722 \\ 0.781 \end{pmatrix} \text{ Вт}$$

Удельные тепловыделения в секции:

$$q_{\text{сск}} := \frac{P_{\text{сск}}}{(b_{\text{сск}} - 2 \cdot \Delta l) \cdot h_{\text{сск}} \cdot \Delta_{\text{сск}}} \quad q_{\text{сск}} = \begin{pmatrix} 4.186 \times 10^3 \\ 4.579 \times 10^3 \\ 4.977 \times 10^3 \\ 5.383 \times 10^3 \end{pmatrix} \quad \text{Вт/м}^3$$

Расчет температуроперепадов на отдельных участках согласно схеме движения теплового потока.

Примем следующие характеристики:

$$\left. \begin{array}{l} \lambda_{\text{ж}} := 0.24 \text{ теплопроводность пропитывающей жидкости} \\ \lambda_{\text{п}} := 0.19 \text{ теплопроводность пленки} \\ \lambda_{\text{ф}} := 200 \text{ теплопроводность алюминиевой фольги} \end{array} \right\} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$$

Найдем эквивалентную теплопроводность на 1-ом участке, когда слои последовательны.

$$\lambda_{\text{экв1}} := \frac{\lambda_{\text{п}} \cdot n1 \cdot \delta1 + \lambda_{\text{ф}} \cdot \Delta_{\text{ф}}}{n1 \cdot \delta1 + \Delta_{\text{ф}}} \quad \lambda_{\text{экв1}} = 46.3 \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$$

Перепад температуры на I участке секции.

$$\Delta T_{1\text{ск}} := q_{\text{сск}} \cdot \frac{(h_{\text{сск}} - \Delta_{\text{сск}})^2}{8 \cdot \lambda_{\text{экв1}}} \quad \Delta T_{1\text{ск}} = \begin{pmatrix} 0.983 \\ 1.075 \\ 1.169 \\ 1.264 \end{pmatrix}$$

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

Тепловой поток пересекает перпендикулярно:

$$\lambda_{\text{экв2ск}} := \frac{n1 \cdot \delta1 + \Delta_{\text{ф}}}{\frac{n1 \cdot \delta1}{\lambda_{\text{п}}} + \frac{\Delta_{\text{ф}}}{\lambda_{\text{ф}}}} \quad \lambda_{\text{экв2ск}} = 0.247 \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$$

Перепад температуры на II участке:

$$\Delta T_{2ск} := q_{сск} \cdot \frac{\Delta c_{ск}^2}{8 \cdot \lambda_{экв2ск}} \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot (h_{сск} - \Delta c_{ск})}{\Delta c_{ск}} \right] \quad \Delta T_{2ск} = \begin{pmatrix} 6.429 \\ 7.033 \\ 7.645 \\ 8.267 \end{pmatrix} \text{ град}$$

Температура на поверхности секции:

$$T_{иск} := T_1 - \Delta T_{1ск} - \Delta T_{2ск} \quad T_{иск} = \begin{pmatrix} 12.588 \\ 31.892 \\ 51.187 \\ 70.469 \end{pmatrix} \text{ град}$$

Тепловыделение в изоляции от корпуса:

$$\Delta ж := 1 \cdot 10^{-3} \cdot \text{tg} \delta_{0ж} = 5.429 \times 10^{-6}$$

$$аж = 0.065 \quad \text{tg} \delta_{жск} := \text{tg} \delta_{0ж} \cdot e^{аж \cdot T_{иск}}$$

$$q_{4ск} := \left(\frac{U_n \cdot 1000 \cdot \epsilon_{ж}}{\epsilon_{ж} \cdot \Delta_{изк} + \epsilon_{п} \cdot \Delta_{ж}} \right)^2 \cdot \omega \cdot \epsilon_{п} \cdot \epsilon_0 \cdot \Delta_{изк} \cdot \text{tg} \delta_{жск} \quad q_{4ск} = \begin{pmatrix} 0.756 \\ 2.662 \\ 9.367 \\ 32.93 \end{pmatrix}$$

Найдем эквивалентная теплопроводность в изоляции от корпуса:

$$\lambda_{эквкор} := \frac{\Delta_{изк} + \Delta_{ф}}{\frac{\Delta_{изк}}{\lambda_{п}} + \frac{\Delta_{ф}}{\lambda_{ф}}} \quad \lambda_{эквкор} = 0.193 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$$

Перепад температуры в изоляции от корпуса:

$$\Delta T_{4ск} := \left(q_{сск} \cdot \frac{h_{сск}}{2} + \frac{q_{4ск}}{2} \right) \cdot \frac{\Delta_{изк}}{\lambda_{эквкор}} \quad \Delta T_{4ск} = \begin{pmatrix} 2.276 \\ 2.493 \\ 2.721 \\ 2.984 \end{pmatrix} \text{ град}$$

Температура на поверхности изоляции от корпуса:

$$T_{иск} := T_1 - \Delta T_{1ск} - \Delta T_{2ск} - \Delta T_{4ск} \quad T_{иск} = \begin{pmatrix} 12.588 \\ 31.892 \\ 51.187 \\ 70.469 \end{pmatrix} \text{ град}$$

Тепловыделение в зазоре между изоляцией и корпусом (в масляной прослойке). В качестве прослойки возьмем касторовое масло:

$$\begin{aligned} \text{tg}\delta_{\text{жск}} &:= \text{tg}\delta_{0\text{ж}} \cdot e^{\text{аж} \cdot \text{Тиск}} \\ q_{5\text{ск}} &:= \left(\frac{U_{\text{н}} \cdot 1000 \cdot \varepsilon_{\text{п}}}{\varepsilon_{\text{ж}} \cdot \Delta_{\text{изк}} + \varepsilon_{\text{п}} \cdot \Delta_{\text{ж}}} \right)^2 \cdot \omega \cdot \varepsilon_{\text{ж}} \cdot \varepsilon_0 \cdot \Delta_{\text{ж}} \cdot \text{tg}\delta_{\text{жск}} \quad q_{5\text{ск}} = \begin{pmatrix} 0.662 \\ 2.299 \\ 7.968 \\ 27.538 \end{pmatrix} \text{ Вт/м}^3 \end{aligned}$$

Перепад температуры в масляной прослойке с учетом конвекции:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{конв}} &:= 1 \quad \lambda_{\text{экв5}} := \lambda_{\text{п}} \cdot \varepsilon_{\text{конв}} \quad \lambda_{\text{экв5}} = 0.19 \\ \Delta T_{5\text{ск}} &:= \left(q_{\text{сск}} \cdot \frac{h_{\text{сск}}}{2} + q_{4\text{ск}} + \frac{q_{5\text{ск}}}{2} \right) \cdot \frac{\Delta_{\text{ж}}}{\lambda_{\text{экв5}}} \quad \Delta T_{5\text{ск}} = \begin{pmatrix} 3.311 \\ 3.635 \\ 4 \\ 4.495 \end{pmatrix} \text{ град} \end{aligned}$$

Найдем тепловыделение в конденсаторе, пренебрегая потерями в соединительных проводах:

$$\begin{aligned} S_{\text{ск}} &:= 2 \cdot h_{\text{ск}} \cdot (V_{\text{ск}} + L_{\text{ск}}) \quad S_{\text{ск}} = 0.22 \text{ м}^2 \\ Q_{\text{ск}} &:= P_{\text{сск}} \cdot \eta_{\text{пос}} \cdot \eta_{\text{пар}} + q_{4\text{ск}} \cdot S_{\text{ск}} + q_{5\text{ск}} \cdot S_{\text{ск}} \quad Q_{\text{ск}} = \begin{pmatrix} 27.636 \\ 30.98 \\ 36.307 \\ 48.455 \end{pmatrix} \text{ Вт/м}^3 \end{aligned}$$

Перепад температуры в стенке корпуса:

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{ст}} &:= 54 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}} \quad \Delta_{\text{мет}} = 5 \times 10^{-4} \\ \Delta T_{6\text{ск}} &:= \frac{Q_{\text{ск}} \cdot \Delta_{\text{мет}}}{S_{\text{ск}} \cdot \lambda_{\text{ст}}} \quad \Delta T_{6\text{ск}} = \begin{pmatrix} 1.161 \times 10^{-3} \\ 1.302 \times 10^{-3} \\ 1.526 \times 10^{-3} \\ 2.036 \times 10^{-3} \end{pmatrix} \text{ град} \end{aligned}$$

Температура на поверхности корпуса:

$$T_{\text{ск}} := T_1 - \Delta T_{1\text{ск}} - \Delta T_{2\text{ск}} - \Delta T_{4\text{ск}} - \Delta T_{6\text{ск}} \quad T_{\text{ск}} = \begin{pmatrix} 10.311 \\ 29.398 \\ 48.464 \\ 67.483 \end{pmatrix} \text{ град}$$

Найдем температуроперепад в воздухе, используя критерии теплового подобия.

Зададим перепад температуры в воздухе:

$$\Delta t_{\text{зад1}} := 5 \quad \Delta t_{\text{зад2}} := 10 \text{ град}$$

$$\begin{aligned} T_{i1\text{ск}} &:= T_{\text{ск}} - \Delta t_{\text{зад1}} \\ T_{i2\text{ск}} &:= T_{\text{ск}} - \Delta t_{\text{зад2}} \end{aligned} \quad T_{i1\text{ск}} = \begin{pmatrix} 5.311 \\ 24.398 \\ 43.464 \\ 62.483 \end{pmatrix} \text{ град} \quad T_{i2\text{ск}} = \begin{pmatrix} 0.311 \\ 19.398 \\ 38.464 \\ 57.483 \end{pmatrix} \text{ град}$$

При этих температурах найдем характеристики воздуха (коэффициент теплопроводности, кинематическую вязкость, коэффициент Прандтля), используя эмпирические уравнения:

$$\begin{aligned} \lambda_{1\text{ск}} &:= (2.44 + 0.0077 \cdot T_{i1\text{ск}}) \cdot 0.01 \\ \lambda_{2\text{ск}} &:= (2.44 + 0.0077 \cdot T_{i2\text{ск}}) \cdot 0.01 \end{aligned} \quad \lambda_{1\text{ск}} = \begin{pmatrix} 0.025 \\ 0.026 \\ 0.028 \\ 0.029 \end{pmatrix} \quad \lambda_{2\text{ск}} = \begin{pmatrix} 0.024 \\ 0.026 \\ 0.027 \\ 0.029 \end{pmatrix}$$

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

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

$$v_{1\text{ск}} = \begin{pmatrix} 1.38 \times 10^{-5} \\ 1.568 \times 10^{-5} \\ 1.756 \times 10^{-5} \\ 1.943 \times 10^{-5} \end{pmatrix} \quad v_{2\text{ск}} = \begin{pmatrix} 1.331 \times 10^{-5} \\ 1.519 \times 10^{-5} \\ 1.706 \times 10^{-5} \\ 1.894 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

$$Pr1_{ск} := 0.707 - 0.0000525 \cdot Ti1_{ск}$$

$$Pr2_{ск} := 0.707 - 0.0000525 \cdot Ti2_{ск}$$

$$Pr1_{ск} = \begin{pmatrix} 0.707 \\ 0.706 \\ 0.705 \\ 0.704 \end{pmatrix}$$

$$Pr2_{ск} = \begin{pmatrix} 0.707 \\ 0.706 \\ 0.705 \\ 0.704 \end{pmatrix}$$

Примеч: $g := 9.8$ $\beta := \frac{1}{273}$ $Pr_c := 0.7$ $L_{ск} := H_{ск}$

$$Gr1_{ск} := g \cdot \beta \cdot \frac{L_{ск}^3}{\nu1_{ск}^2} \cdot \Delta t_{зад1}$$

$$Gr2_{ск} := g \cdot \beta \cdot \frac{L_{ск}^3}{\nu2_{ск}^2} \cdot \Delta t_{зад2}$$

$$Gr1_{ск} = \begin{pmatrix} 4.035 \times 10^6 \\ 3.126 \times 10^6 \\ 2.494 \times 10^6 \\ 2.037 \times 10^6 \end{pmatrix}$$

$$Gr2_{ск} = \begin{pmatrix} 8.678 \times 10^6 \\ 6.665 \times 10^6 \\ 5.28 \times 10^6 \\ 4.288 \times 10^6 \end{pmatrix}$$

Для определения критерия Нуссельта 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 $Gr \cdot Pr > 10^9$ $C=0.15$ $n=0.33$.

$$Gr1_{скj} \cdot Pr1_{скj} =$$

2.852 · 10 ⁶
2.206 · 10 ⁶
1.758 · 10 ⁶
1.433 · 10 ⁶

$$Gr2_{скj} \cdot Pr2_{скj}$$

6.135 · 10 ⁶
4.705 · 10 ⁶
3.722 · 10 ⁶
3.019 · 10 ⁶

$$Nu1_{скj} := 0.76 \cdot (Gr1_{скj} \cdot Pr1_{скj})^{0.25} \cdot \left(\frac{Pr1_{скj}}{Pr_c} \right)^{0.25}$$

$$Nu2_{скj} := 0.76 \cdot (Gr2_{скj} \cdot Pr2_{скj})^{0.25} \cdot \left(\frac{Pr2_{скj}}{Pr_c} \right)^{0.25}$$

$$Nu1_{скj} =$$

31.306
29.351
27.719
26.331

$$Nu2_{скj} =$$

37.918
35.471
33.441
31.723

Найдем коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_{k1ck_j} := \frac{Nu1ck_j \cdot \lambda_{1ck_j}}{L_{ck}}$$

$$\alpha_{k1ck_j} =$$

4.782
4.749
4.736
4.736

$$\alpha_{k2ck_j} := \frac{Nu2ck_j \cdot \lambda_{2ck_j}}{L_{ck}}$$

$$\alpha_{k2ck_j} =$$

5.703
5.656
5.634
5.631

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

$$S_{бокck} := 2 \cdot H_{ck} \cdot (B_{ck} + L_{ck}) + B_{ck} \cdot L_{ck} \quad S_{бокck} = 0.334$$

$$\Delta t_{пол1ck_j} := \frac{Q_{ck_j}}{\alpha_{k1ck_j} \cdot S_{бокck}}$$

$$\Delta t_{пол2ck_j} := \frac{Q_{ck_j}}{\alpha_{k2ck_j} \cdot S_{бокck}}$$

$$\Delta t_{пол1ck_j} =$$

17.302
19.531
22.955
30.633

$$\Delta t_{пол2ck_j} =$$

14.51
16.401
19.294
25.765

град

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

$$\Delta 1_{ck_j} := \frac{\Delta t_{пол1ck_j} - \Delta t_{пол2ck_j}}{\Delta t_{зад1} - \Delta t_{зад2}}$$

$$\Delta 2_{ck_j} := \Delta t_{пол1ck_j} - \Delta t_{зад1} \cdot \Delta 1_{ck_j}$$

$$\Delta t_{возck_j} := \frac{\Delta 2_{ck_j}}{1 - \Delta 1_{ck_j}}$$

$$\Delta t_{возck} = \begin{pmatrix} 12.894 \\ 13.937 \\ 15.366 \\ 17.989 \end{pmatrix} \text{ град}$$

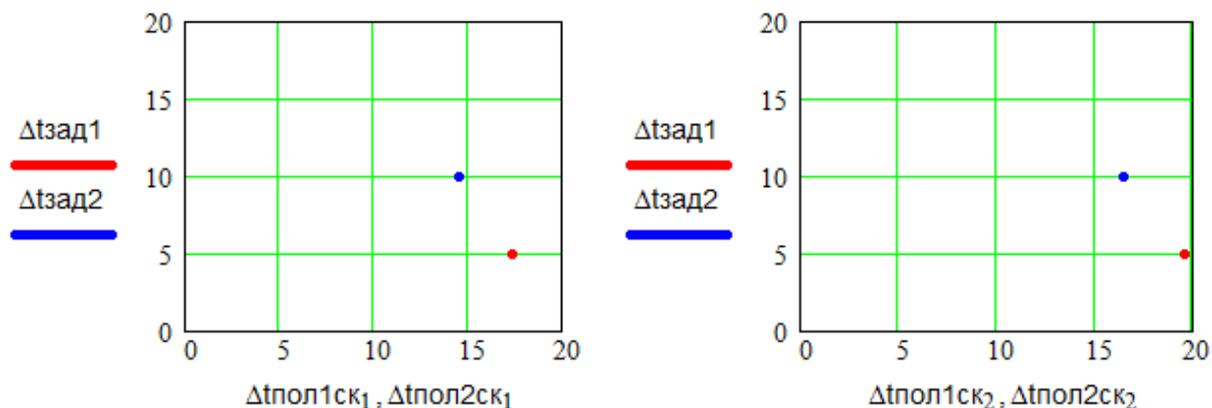


Рисунок 5 – Графики зависимости $\Delta t_{\text{зад}}$ от $\Delta t_{\text{пол}}$

Построим график тепловой устойчивости:

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

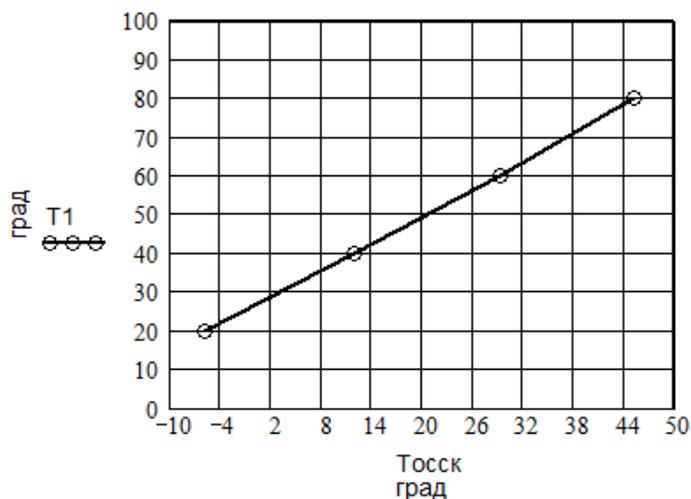


Рисунок 6 – Графики тепловой устойчивости

Из справочника [2] находим допустимые температуры для выбранных материалов и сравниваем с максимальной температурой внутри конденсатора при максимальной температуре окружающей среды согласно категории исполнения конденсатора:

$$T_{\text{доп}} := 130 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{\text{макс}} := 75 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{при } T_{\text{осск}} = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Так как рассчитанное значение температуры $T_{\text{макс}}$ в изоляции конденсатора меньше допустимой температуры $T_{\text{доп}}$, определяемой классом нагревостойкости материала изоляции, то условие тепловой устойчивости выполняется.

Сравним результаты теплового расчета всех вариантов конденсатора.

Для этого составим таблицу 9.

Таблица 9 – результаты теплового расчета

Характеристика	Вариант		
	Пленочная изоляция (полиэтилентерефталатная пленка)	Пленочная изоляция (поликарбонатная пленка)	Бумажно-пленочная изоляция
$\epsilon_{п/ \epsilon_{бп}}$	3.2	3.0	3.3
$\epsilon_{ж}$	4.5	4.5	4.5
$\epsilon_{бп}$ при 20/80 °С	–	–	3.341/5.662
t_{gp} при 20/80 °С	0.0003/0.0005	0.00008/0.0001	0.0003/0.0005
t_{gj} при 20/80 °С	0.001/0.05	0.001/0.05	0.001/0.05
t_{gb} при 20/80 °С	–	–	0.00275/0.026
$T_{осск}$, °С	40	40	40
$T_{доп}$, °С	130	140	Приведены после таблицы
$T_{макс}$, °С	75	75	60

Для бумажно-пленочной изоляции варианта:

$T_{доп} := 130$ °С для полиэтилентерефталатной пленки

$T_{доп} := 150$ °С для касторового масла

$T_{доп} := 100$ °С для конденсаторной бумаги КОН 1

По данным таблицы наименьшую максимальную температуру имеет конденсатор с бумажно-пленочной изоляцией, это обуславливается тем, что при таком способе изоляции используются два материала диэлектрика, поэтому значение максимальной температуры ниже, чем у пленочной изоляции. Стоит отметить, что при температуре в 110–120°С бумага окисляется и снижает свою механическую прочность. Пленки более стойкие к повышенным температурам и дольше сохраняют свою механическую прочность. Конденсатор относится к классу исполнения «У», у которого рабочий диапазон температур варьируется от –45 до +40 °С.

2.3 Расчет срока службы

Оценку срока службы производим на основе термофлуктуационной теории [15], согласно которой под разрушением (пробоем) изоляции понима-

ется разрыв химической связи за счет энергии тепловых флуктуации молекул диэлектрика и воздействия электрических и механических сил, вызывающих искажение энергетических диаграмм.

Для проведения расчета примем следующие параметры изоляции:

$D := 5 \cdot 10^{-19}$	- энергия диссоциации химической связи:
$A := 10 \cdot 10^{-29}$	- постоянный коэффициент, характеризующий материал диэлектрика
$b := 0.002$	- температурны коэффициент
$v_0 := 2 \cdot 10^{-7}$	- элементарный объем, содержащий хотя бы одну неоднородность
$K := 1.38 \cdot 10^{-23}$	- постоянная Больцмана
$\tau_0 := 1 \cdot 10^{-13}$	- время релаксации:
$v := 6$	- коэффициент неоднородности
$p := 0.1$	- концентрация неоднородностей
$k := \text{пос-ппар } k = 45$	- количество секций
$P_\tau := 0.9$	- заданная вероятность безотказной работы конденсатора
$U_{и} := 80000$	- амплитуда перенапряжений В
$\sigma_{и} := 5000$	- среднеквадратичное отклонение
$N := 10000$	- количество импульсов перенапряжений
$t_{и} := 20 \cdot 10^{-6}$	- длительность импульса перенапряжений
$t_{г} := 31.536 \cdot 10^6$	- продолжительность года

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

$$P_n := P_\tau^{\frac{1}{k}} \quad P_n = 0.998$$

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

$$v := (b_{сск} - 2 \cdot \Delta l) \cdot b_{сск} \cdot \Delta_{сск} \quad v = 4.835 \times 10^{-5}$$

$$F_y := \left(1 - e^{1.67 \cdot y \cdot \ln(1.3 \cdot p)}\right)^{\frac{v}{v_0 \cdot \eta \cdot y}} \quad F_y = 0.999$$

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

$$\beta := \frac{\nu}{1 + (\nu - 1) \cdot \frac{1}{y^2 - 1} \cdot \left(\frac{y}{\sqrt{y^2 - 1}} \cdot \ln(y + \sqrt{y^2 - 1}) \right)} \quad \beta = 2.937$$

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

$$t_i := \begin{pmatrix} 5 \cdot 10^6 \\ 19.5 \cdot 10^6 \\ 11 \cdot 10^6 \\ 6 \cdot 10^6 \end{pmatrix} \quad T_{oc} := \begin{pmatrix} 253 \\ 273 \\ 293 \\ 313 \end{pmatrix}$$

При данных температурах найдем температуры изоляции из графика тепловой устойчивости:

$$T_{из} := \begin{pmatrix} 278 \\ 295 \\ 323 \\ 348 \end{pmatrix}$$

Перенапряжения, являющиеся случайными величинами, заменим переменными:

$$U_{max} := U_i + 4 \cdot \sigma_i \quad U_{max} = 1 \times 10^5 \quad \text{В}$$

$$U_{min} := U_i - 4 \cdot \sigma_i \quad U_{min} = 6 \times 10^4 \quad \text{В}$$

Число интервалов:

$$N := \frac{U_{max} - U_{min}}{\sigma_i} \quad N = 8$$

Ширина интервалов:

$$\Delta U := \frac{U_{max} - U_{min}}{N} \quad \Delta U = 5 \times 10^3 \quad \text{В}$$

Примем, что распределение значений перенапряжения U_j подчиняется нормальному закону:

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

$j =$	$U_j =$	$U_{j-1} =$	$U_{cpj} =$	$\frac{U_j - U_{и}}{2\sigma_{и}} =$	$\frac{U_{j-1} - U_{и}}{2\sigma_{и}} =$	$FU :=$	
1	$9.5 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$	$9.75 \cdot 10^4$	1.5	2		0.00023
2	$9 \cdot 10^4$	$9.5 \cdot 10^4$	$9.25 \cdot 10^4$	1	1.5		0.00135
3	$8.5 \cdot 10^4$	$9 \cdot 10^4$	$8.75 \cdot 10^4$	0.5	1		0.00621
4	$8 \cdot 10^4$	$8.5 \cdot 10^4$	$8.25 \cdot 10^4$	0	0.5		0.02275
5	$7.5 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^4$	$7.75 \cdot 10^4$	-0.5	0		0.06681
6	$7 \cdot 10^4$	$7.5 \cdot 10^4$	$7.25 \cdot 10^4$	-1	-0.5		0.15866
7	$6.5 \cdot 10^4$	$7 \cdot 10^4$	$6.75 \cdot 10^4$	-1.5	-1		0.30854
8	$6 \cdot 10^4$	$6.5 \cdot 10^4$	$6.25 \cdot 10^4$	-2	-1.5		0.50000
9	$5.5 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$	$5.75 \cdot 10^4$	-2.5	-2		0.69146
10	$5 \cdot 10^4$	$5.5 \cdot 10^4$	$5.25 \cdot 10^4$	-3	-2.5		0.84134
11	$4.5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	$4.75 \cdot 10^4$	-3.5	-3		0.93319
12	$4 \cdot 10^4$	$4.5 \cdot 10^4$	$4.25 \cdot 10^4$	-4	-3.5		0.97725
13	$3.5 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	$3.75 \cdot 10^4$	-4.5	-4		0.99379
14	$3 \cdot 10^4$	$3.5 \cdot 10^4$	$3.25 \cdot 10^4$	-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 $(FU_j - FU_{j-1})$:

$$\Delta F_j := FU_j - FU_{j-1} \quad E_{рабс} = 2.844 \times 10^6 \frac{В}{М}$$

$$\tau_{бj} := \frac{\tau_{и} \cdot N \cdot \Delta F_j}{\tau_{г}} \quad E_{рабд} = 8.741 \times 10^7 \frac{В}{М} \quad U_c = 1.706 \times 10^3 В$$

$$\eta E_j := E_{рабс} \cdot \frac{U_{cpj}}{U_c}$$

$FU_j =$	$FU_{j-1} =$	$\Delta F_j =$	$\tau\theta_j =$	$\eta E_j =$
1.35·10 ⁻³	2.3·10 ⁻⁴	0.0011	5.682·10 ⁻¹⁵	1.625·10 ⁸
6.21·10 ⁻³	1.35·10 ⁻³	0.0049	2.466·10 ⁻¹⁴	1.542·10 ⁸
0.0228	6.21·10 ⁻³	0.0165	8.392·10 ⁻¹⁴	1.458·10 ⁸
0.0668	0.0228	0.0441	2.235·10 ⁻¹³	1.375·10 ⁸
0.1587	0.0668	0.0919	4.66·10 ⁻¹³	1.292·10 ⁸
0.3085	0.1587	0.1499	7.604·10 ⁻¹³	1.208·10 ⁸
0.5	0.3085	0.1915	9.714·10 ⁻¹³	1.125·10 ⁸
0.6915	0.5	0.1915	9.714·10 ⁻¹³	1.042·10 ⁸
0.8413	0.6915	0.1499	7.604·10 ⁻¹³	9.583·10 ⁷
0.9332	0.8413	0.0918	4.66·10 ⁻¹³	8.75·10 ⁷
0.9772	0.9332	0.0441	2.235·10 ⁻¹³	7.917·10 ⁷
0.9938	0.9772	0.0165	8.392·10 ⁻¹⁴	7.083·10 ⁷
0.9986	0.9938	0.0049	2.466·10 ⁻¹⁴	6.25·10 ⁷
0.9998	0.9986	0.0011	5.682·10 ⁻¹⁵	5.417·10 ⁷

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

При рабочей напряженности поля при температуре

$$T1 := 278$$

$$x1 := \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T1} \cdot \beta \cdot \eta \cdot E_{рабс} \quad x1 = 9.579 \times 10^{-4}$$

$$\phi x1 := \sqrt{1 - 2 \cdot x1} - x1 \cdot \ln\left(\frac{1}{x1} + \frac{1}{x1} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot x1} - 1\right) \quad \phi x1 = 0.992$$

$$q1 := \frac{1}{\tau_0} \cdot e^{\frac{-D \cdot \phi x1}{2 \cdot K \cdot T1}} \quad q1 = 8.579 \times 10^{-16}$$

С учетом перенапряжений

$$x01_j := \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T1} \cdot \beta \cdot \eta E_j$$

$$\phi x01_j := \sqrt{1 - 2 \cdot x01_j} - x01_j \cdot \ln\left(\frac{1}{x01_j} + \frac{1}{x01_j} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot x01_j} - 1\right) \quad q01_j := \frac{1}{\tau_0} \cdot e^{\frac{-D \cdot \phi x01_j}{2 \cdot K \cdot T1}}$$

$x_{01j} =$	$\phi x_{01j} =$	$\tau_{6j} =$	$q_{01j} =$
0.055	0.75	5.6824·10 ⁻¹⁵	6.0123·10 ⁻⁹
0.052	0.76	2.4658·10 ⁻¹⁴	3.1298·10 ⁻⁹
0.049	0.77	8.3917·10 ⁻¹⁴	1.6124·10 ⁻⁹
0.046	0.78	2.2354·10 ⁻¹³	8.2152·10 ⁻¹⁰
0.044	0.791	4.6601·10 ⁻¹³	4.1373·10 ⁻¹⁰
0.041	0.802	7.6043·10 ⁻¹³	2.058·10 ⁻¹⁰
0.038	0.813	9.7139·10 ⁻¹³	1.0103·10 ⁻¹⁰
0.035	0.824	9.7139·10 ⁻¹³	4.8903·10 ⁻¹¹
0.032	0.835	7.6043·10 ⁻¹³	2.3314·10 ⁻¹¹
0.029	0.847	4.6601·10 ⁻¹³	1.0934·10 ⁻¹¹
0.027	0.859	2.2354·10 ⁻¹³	5.036·10 ⁻¹²
0.024	0.871	8.3917·10 ⁻¹⁴	2.274·10 ⁻¹²
0.021	0.883	2.4658·10 ⁻¹⁴	1.0044·10 ⁻¹²
0.018	0.896	5.6824·10 ⁻¹⁵	4.3268·10 ⁻¹³

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

$$S1 = 9.494 \times 10^{-22}$$

При рабочей напряженности поля при температуре

$$T2 := 295$$

$$x2 := \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T2} \cdot \beta \cdot (\eta \cdot E_{рабс})$$

$$\phi x2 := \sqrt{1 - 2 \cdot x2} - x2 \cdot \ln \left(\frac{1}{x2} + \frac{1}{x2} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot x2} - 1 \right) \quad x2 = 9.259 \times 10^{-4}$$

$$q2 := \frac{1}{\tau_0} \cdot e^{\frac{-D \cdot \phi x2}{2 \cdot K \cdot T2}}$$

$$\phi x2 = 0.992$$

$$q2 = 3.502 \times 10^{-14}$$

С учетом перенапряжений

$$x_{02j} := \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T2} \cdot \beta \cdot \eta E_j$$

$$\phi x_{02j} := \sqrt{1 - 2 \cdot x_{02j}} - x_{02j} \cdot \ln \left(\frac{1}{x_{02j}} + \frac{1}{x_{02j}} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot x_{02j}} - 1 \right) \quad q_{02j} := \frac{1}{\tau_0} \cdot e^{\frac{-D \cdot \phi x_{02j}}{2 \cdot K \cdot T2}}$$

$x_{02j} =$	$\phi x_{02j} =$	$\tau_{6j} =$	$q_{02j} =$
0.053	0.7563	5.6824·10 ⁻¹⁵	6.7337·10 ⁻⁸
0.05	0.7661	2.4658·10 ⁻¹⁴	3.6932·10 ⁻⁸
0.047	0.7761	8.3917·10 ⁻¹⁴	2.0064·10 ⁻⁸
0.045	0.7862	2.2354·10 ⁻¹³	1.0792·10 ⁻⁸
0.042	0.7964	4.6601·10 ⁻¹³	5.7434·10 ⁻⁹
0.039	0.8069	7.6043·10 ⁻¹³	3.0225·10 ⁻⁹
0.037	0.8175	9.7139·10 ⁻¹³	1.5716·10 ⁻⁹
0.034	0.8284	9.7139·10 ⁻¹³	8.068·10 ⁻¹⁰
0.031	0.8395	7.6043·10 ⁻¹³	4.0849·10 ⁻¹⁰
0.028	0.8508	4.6601·10 ⁻¹³	2.0375·10 ⁻¹⁰
0.026	0.8624	2.2354·10 ⁻¹³	9.9974·10 ⁻¹¹
0.023	0.8743	8.3917·10 ⁻¹⁴	4.8178·10 ⁻¹¹
0.02	0.8865	2.4658·10 ⁻¹⁴	2.2755·10 ⁻¹¹
0.018	0.8991	5.6824·10 ⁻¹⁵	1.0506·10 ⁻¹¹

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

$$S2 = 1.311 \times 10^{-20}$$

При рабочей напряженности поля при температуре:

$$T3 := 323$$

$$x3 := \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T3} \cdot \beta \cdot (\eta \cdot E_{рабс}) \quad x3 = 8.755 \times 10^{-4}$$

$$\phi x3 := \sqrt{1 - 2 \cdot x3} - x3 \cdot \ln \left(\frac{1}{x3} + \frac{1}{x3} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot x3} - 1 \right) \quad \phi x3 = 0.992$$

$$q3 := \frac{1}{\tau0} \cdot e^{\frac{-D \cdot \phi x3}{2 \cdot K \cdot T3}} \quad q3 = 6.733 \times 10^{-12}$$

С учетом перенапряжений:

$$x03j := \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T3} \cdot \beta \cdot \eta E_j$$

$$\phi x03j := \sqrt{1 - 2 \cdot x03j} - x03j \cdot \ln \left(\frac{1}{x03j} + \frac{1}{x03j} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot x03j} - 1 \right) \quad q03j := \frac{1}{\tau0} \cdot e^{\frac{-D \cdot \phi x03j}{2 \cdot K \cdot T3}}$$

$$x03j = \quad \phi x03j =$$

0.05	0.7667
0.047	0.7761
0.045	0.7857
0.042	0.7954
0.04	0.8052
0.037	0.8153
0.035	0.8255
0.032	0.8359
0.03	0.8465
0.027	0.8574
0.024	0.8685
0.022	0.8799
0.019	0.8916
0.017	0.9036

$$\tau6j =$$

5.6824·10 ⁻¹⁵
2.4658·10 ⁻¹⁴
8.3917·10 ⁻¹⁴
2.2354·10 ⁻¹³
4.6601·10 ⁻¹³
7.6043·10 ⁻¹³
9.7139·10 ⁻¹³
9.7139·10 ⁻¹³
7.6043·10 ⁻¹³
4.6601·10 ⁻¹³
2.2354·10 ⁻¹³
8.3917·10 ⁻¹⁴
2.4658·10 ⁻¹⁴
5.6824·10 ⁻¹⁵

$$q03j =$$

2.1075·10 ⁻⁶
1.244·10 ⁻⁶
7.2828·10 ⁻⁷
4.2271·10 ⁻⁷
2.4313·10 ⁻⁷
1.3849·10 ⁻⁷
7.8076·10 ⁻⁸
4.3532·10 ⁻⁸
2.3985·10 ⁻⁸
1.3045·10 ⁻⁸
6.9958·10 ⁻⁹
3.6938·10 ⁻⁹
1.9167·10 ⁻⁹
9.753·10 ⁻¹⁰

$$S3 := \sum_{j=1}^{14} (q03j \cdot \tau6j)$$

$$S3 = 5.612 \times 10^{-19}$$

При рабочей напряженности поля при температуре:

$$T4 := 348$$

$$x4 := \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T4} \cdot \beta \cdot (\eta \cdot E_{рабс}) \quad x4 = 8.328 \times 10^{-4}$$

$$\phi x4 := \sqrt{1 - 2 \cdot x4} - x4 \cdot \ln \left(\frac{1}{x4} + \frac{1}{x4} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot x4} - 1 \right) \quad \phi x4 = 0.993$$

$$q4 := \frac{1}{\tau0} \cdot e^{\frac{-D \cdot \phi x4}{2 \cdot K \cdot T4}} \quad q4 = 3.607 \times 10^{-10}$$

С учетом перенапряжений:

$$x_{04j} := \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T^4} \cdot \beta \cdot \eta E_j$$

$$\phi_{x_{04j}} := \sqrt{1 - 2 \cdot x_{04j}} - x_{04j} \cdot \ln \left(\frac{1}{x_{04j}} + \frac{1}{x_{04j}} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot x_{04j}} - 1 \right) \quad q_{04j} := \frac{1}{\tau_0} \cdot e^{\frac{-D \cdot \phi_{x_{04j}}}{2 \cdot K \cdot T^4}}$$

$x_{04j} =$	$\phi_{x_{04j}} =$	$\tau_{6j} =$	$q_{04j} =$
0.048	0.7757	5.6824·10 ⁻¹⁵	2.9068·10 ⁻⁵
0.045	0.7847	2.4658·10 ⁻¹⁴	1.8129·10 ⁻⁵
0.043	0.794	8.3917·10 ⁻¹⁴	1.1225·10 ⁻⁵
0.04	0.8033	2.2354·10 ⁻¹³	6.8982·10 ⁻⁶
0.038	0.8128	4.6601·10 ⁻¹³	4.2051·10 ⁻⁶
0.035	0.8225	7.6043·10 ⁻¹³	2.5416·10 ⁻⁶
0.033	0.8323	9.7139·10 ⁻¹³	1.5223·10 ⁻⁶
0.031	0.8424	9.7139·10 ⁻¹³	9.0293·10 ⁻⁷
0.028	0.8526	7.6043·10 ⁻¹³	5.2997·10 ⁻⁷
0.026	0.8631	4.6601·10 ⁻¹³	3.0754·10 ⁻⁷
0.023	0.8737	2.2354·10 ⁻¹³	1.7626·10 ⁻⁷
0.021	0.8847	8.3917·10 ⁻¹⁴	9.964·10 ⁻⁸
0.018	0.896	2.4658·10 ⁻¹⁴	5.5473·10 ⁻⁸
0.016	0.9075	5.6824·10 ⁻¹⁵	3.0353·10 ⁻⁸

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

$$S_4 = 9.94 \times 10^{-18}$$

Найдем время до отказа:

$$q_0 := \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{pmatrix}$$

$$S := \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{pmatrix}$$

$$q_0 = \begin{pmatrix} 8.5785 \times 10^{-16} \\ 3.5016 \times 10^{-14} \\ 6.7326 \times 10^{-12} \\ 3.6072 \times 10^{-10} \end{pmatrix}$$

$$S = \begin{pmatrix} 9.4939 \times 10^{-22} \\ 1.3107 \times 10^{-20} \\ 5.6124 \times 10^{-19} \\ 9.94 \times 10^{-18} \end{pmatrix}$$

$$\tau_{СП} := \frac{1}{\sum_{i=1}^4 \left[\frac{\tau_i}{\tau_{\Gamma}} \cdot (q_0 + S) \right]} \quad \tau_{СП} = 4.0753 \times 10^4 \text{ года}$$

где τ_i – продолжительность периода с соответствующей температурой;

τ_{Γ} – продолжительность года (365 дней);

q_0 – вероятность разрыва химической связи при воздействии Ераб;

S – вероятность разрыва химической связи с учетом воздействия перенапряжения.

Сведем полученные результаты в таблицу 10.

Таблица 10 – сравнение срока службы

Вариант	Время до пробоя, год
Пленочная изоляция (полиэтилентерефталатная пленка)	$4.0753 \cdot 10^4$
Пленочная изоляция (поликарбонатная пленка)	$3.9404 \cdot 10^4$
Бумажно-пленочная изоляция	$4.9688 \cdot 10^5$

Расчет срока службы конденсатора производился на основе термофлуктуационной теории, рассматривающей процесс разрушения материала вследствие разрыва межатомных связей при тепловых колебаниях атома, т.е. тепловых термофлуктуаций.

2.4 Конструктивные расчеты

К конструктивным расчетам конденсатора можно отнести расчеты радиуса экрана на проходной изолятор, размеров конденсатора с учетом теплового расширения масла, крепежных элементов, размеров трубопровода и системы охлаждения и др.

Конструктивные расчеты для всех вариантов одинаковы.

Расчет радиуса экрана для выравнивания электрического поля на фланце изолятора.

Максимальная напряженность электрического поля у экрана m высоты изолятора.

$$U_n = 70 \text{ кВ} \quad l_d = 0.732 \text{ м}$$

$$R_{\text{э}} := \begin{pmatrix} 0.02 \\ 0.08 \\ 0.18 \end{pmatrix} \quad H := l_d + R_{\text{э}} \quad H = \begin{pmatrix} 0.752 \\ 0.812 \\ 0.912 \end{pmatrix}$$

$$E_{\max i} := \frac{U_n \cdot 1000}{R_{эi} \cdot \left(1 - \frac{R_{эi}}{2 \cdot H_i}\right)} \cdot \left[1 + 3 \cdot \left(\frac{R_{эi}}{2 \cdot H_i}\right)^2\right]$$

$$E_{\max i} =$$

$3.549 \cdot 10^6$
$9.271 \cdot 10^5$
$4.441 \cdot 10^5$

Найдем, при заданном радиусе экрана критическая напряженность электрического поля, при которой развиваются коронные разряды.

$$m := 0.8 \quad \text{коэффициент гладкости поверхности экрана } 0,6 - 0,8$$

$$\delta := 1 \quad \text{относительная плотность воздуха при нормальных условиях}$$

$$E_{\text{крит}} := 1.65 \cdot m \cdot \delta \cdot 3 \cdot 10^6 \cdot \frac{0.13}{(\delta \cdot R_{э})^{0.38}} \quad E_{\text{крит}} = \begin{pmatrix} 2.276 \times 10^6 \\ 1.344 \times 10^6 \\ 9.877 \times 10^5 \end{pmatrix}$$

Радиус экрана найдем из условия равновесия максимальной и критической напряженностей электрического поля. Воспользуемся графическим определением этого условия, что соответствует точке пересечения кривых изменения этих напряженностей от радиуса экрана.

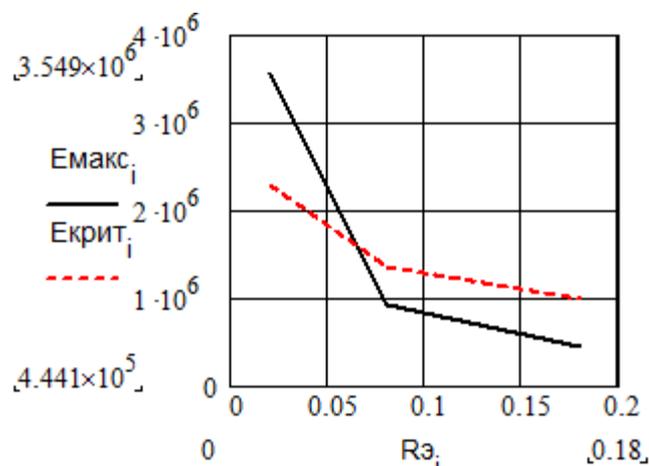


Рисунок 6 – График зависимости E_{\max} и $E_{\text{крит}}$ от радиуса экрана.

Точка пересечения этих кривых соответствует радиуса экрана $R_{\text{экр}}=0.08$ м.

По результатам расчетов составим таблицу 11, в которую приведем основные критерии конденсаторов.

Варианты расчета импульсного конденсатора с бумажно-масляной и пленочной изоляциями представлены в Приложение 1 и в Приложение 2.

Таблица 11 – результаты расчетов

Вариант	Ерабс, В/м·10 ⁶	Высота Н, м	Ширина В, м	Длина L, м	Тмакс, °С	Время до пробоя, год
Пленочная изоляция (полиэтилен-терефталатная пленка)	2.844	0.162	0.302	0.376	75	4.0753·10 ⁴
Пленочная изоляция (поликарбонатная пленка)	2.844	0.162	0.302	0.397	75	3.9404·10 ⁴
Бумажно-пленочная изоляция	1.422	0.167	0.307	6.595	60	4.9688·10 ⁵

Из таблицы видно, что пленочная изоляция с полиэтилентерефталатной пленкой обладает наименьшими габаритными размерами при одинаковой рабочей напряженностью со вторым вариантом.

Произведем оптимизацию конденсатора с пленочной изоляцией с полиэтилентерефталатной пленкой. Данный конденсатор обладает достаточным запасом электрической прочности, поэтому уменьшим габариты конденсатора, за счет уменьшения числа последовательно соединенных секций. Полученный результат сведем в таблицу 12.

Таблица 12 – результат оптимизации

Вариант	Ерабс, В/м·10 ⁶	npos	nпар	Высота Н, м	Ширина В, м	Длина L, м	Тмакс, °С
Рассчитанный конденсатор	2.844	15	3	0.162	0.302	0.376	75
Оптимизированный конденсатор	4.266	9	2	0.162	0.302	0.167	73

Длина конденсатора уменьшилась на 55.6%, рабочая напряженность, приходящаяся на одну секцию, осталась в допустимом диапазоне. Так же максимальная температура Тмакс уменьшилась на два градуса.

Приложение 1. Расчет импульсного конденсатора с пленочной изоляцией на напряжение 70 кВ.

В расчете используется поликарбонатная пленка.

1. Электрический расчет

1.1. Расчет наружной изоляции

1.1.1. Исходя из технического задания (по заданному значению $U_{ном}$) по ГОСТ 1516.1-76 находим U_c - напряжение, выдерживаемое изолятором при сухой и чистой и поверхности, $U_{дгост}$ - выдерживаемое напряжение под дождем, $U_{и}$ - импульсное выдерживаемое напряжение.

$$U_c := 150 \text{ кВ} \quad U_{дгост} := 120 \text{ кВ} \quad U_{и} := 260 \text{ кВ} \quad U_{н} = 70 \text{ кВ}$$

1.1.2. Выполняем расчет наружной изоляции, принимая за расчетное напряжение

$$U_0 := 1.1 \cdot U_c \quad U_0 = 165 \text{ кВ}$$

1.1.3. Для определения l используем эмпирические формулы

$$l_b := \frac{1.1 \cdot U_c}{295} \quad l_b = 0.559 \text{ м}$$

$$l_d := \frac{U_c}{205} \quad l_d = 0.732 \text{ м}$$

$$l_{и} := \frac{U_{и}}{500} \quad l_{и} = 0.52 \text{ м}$$

Из трёх найденных значений выбираем наибольшее, т.е. $l_d = 0.732 \text{ м}$

1.1.4. Находим длину масляной части изолятора

$$l_m := \frac{U_0}{800} \quad l_m = 0.206 \text{ м}$$

1.1.5. Рассчитываем количество ребер и их размеры:

$$U_{н} = 70$$

$n_p := 1.5 + 0.065 \cdot U_{н}$	$n_p = 6.05$	Принимаем	$n_p := 6$
$t_p := \frac{l_d}{n_p}$	$t_p = 0.122$	Принимаем	$t_p := 0.125 \text{ м}$
$a_p := 0.9 \cdot t_p$	$a_p = 0.113$	Принимаем	$a_p := 0.12 \text{ м}$
		Принимаем	$a_{p1} := 0.13 \text{ м}$

1.1.6. Производим проверку изолятора из условия перекрытия под дождем:

$$U_{др} := \left(124 \cdot l_d^{0.77} + 42 \cdot n_p \cdot t_p^{0.6} \cdot \frac{a_p^1}{a_p} \right) \quad U_{др} = 175.889 \quad U_{дгост} = 120 \quad \text{кВ}$$

1.2. Электрический расчет внутренней изоляции

1.2.1. Из справочника [2] находим электрическую прочность электрическую прочность поликарбонатной пленки $E_{пр1} = 180 \text{ МВ/м}$.

$$E_{пр} := 150 \cdot 10^6 \text{ В/м}$$

1.2.2. Определим значение допустимой рабочей напряженности $E_{рабд}$, принимая значения коэффициента запаса k_1 от 1.1 до 1,6, коэффициента разброса электрической прочности k_2 от 1.2 до 2.2 и коэффициента изменения длительной электрической прочности k_3 от 1.3 до 2.5. Значения коэффициентов берут тем больше, чем больше частота переменного тока

$$k_1 := 1.1 \quad k_2 := 1.2 \quad k_3 := 1.3$$

$$E_{рабд} := \frac{E_{пр}}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3} \quad E_{рабд} = 8.741 \times 10^7 \text{ В/м}$$

1.2.3. Изоляцию между обкладками выполним из 4 слоев поликарбонатной пленки толщиной 20 мкм.

$$n_1 := 4 \quad \delta_1 := 20 \cdot 10^{-6} \text{ м} \quad \epsilon_1 := 2.25$$

$$d := (n_1 \cdot \delta_1) \quad d = 8 \times 10^{-5} \text{ м}$$

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

$$n_{пос} := \frac{U_H \cdot 1000}{E_{рабд} \cdot d} \quad n_{пос} = 10.01 \quad \text{Примем} \quad n_{пос} := 9$$

2.2.5. Определим рабочую напряженность электрического поля и значение напряжения, приходящихся на одну секцию, с учетом воздействия импульсного напряжения.

$$U_c := \frac{U_H \cdot 1000}{8} \cdot \frac{0.78 \cdot \tau_1^2}{\tau_2^2} \quad U_c = 1.706 \times 10^3 \text{ - импульсное напряжение, приходящееся на одну секцию}$$

$$E_{рабс} := \frac{U_c}{n_{пос} \cdot (n_1 \cdot \delta_1)} \quad E_{рабс} = 2.37 \times 10^6$$

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

$$E_1 := \frac{U_c}{n_1 \cdot \delta_1} \quad E_1 = 2.133 \times 10^7 \text{ В/м} \quad E_{пр} = 1.5 \times 10^8 \text{ В/м}$$

Из проведенных расчетов видно, что напряженности электрического поля E_1 пленочной изоляции не превышают значения электрической прочности $E_{пр}$.

Расчет закраины конденсатора, толщины изоляции от корпуса

1.2.7. Найдем испытательное напряжение секции и длину закраины

$$U_{испс} := 2.2 \cdot U_c \quad U_{испс} = 3.754 \times 10^3 \text{ В}$$

$$k_{зак} := 1.5 \left(\frac{\text{мм}}{\text{кВ}} \right) \text{ - коэффициент закраины}$$

$$l_{тех} := 5 \text{ (мм)} \text{ - допуск на технологическое смещение фольги}$$

$$\Delta l := k_{зак} \cdot U_{испс} + l_{тех} \quad \Delta l = 5.636 \times 10^3 \text{ (мм)} \quad \text{Примем} \quad \Delta l := 2.6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

1.2.8. Найдем толщину изоляции между секциями и от корпуса

$$k_1 := 1.1 \quad k_2 := 1.2 \quad k_3 := 1.3 \quad k_{п} := 1.3$$

$$\Delta_{изс} := \frac{2U_{испс}}{E_{рабс}} \cdot k_1 \quad \Delta_{изс} = 3.485 \times 10^{-3} \text{ м} \quad \text{Примем} \quad \Delta_{изс} := 3.3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\Delta_{изк} := \frac{U_n \cdot 1000}{E_{пр}} \cdot k_1 \cdot k_{п} \quad \Delta_{изк} = 6.673 \times 10^{-4} \text{ м} \quad \text{Примем} \quad \Delta_{изк} := 5.7 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

При расчете изоляции от корпуса принимаем значение большее рассчитанного. Т.к. изоляция должна выдрезать механические повреждения при сборке конденсатора.

2.3. Расчет емкости секций

2.3.1. Выполним расчет диэлектрической проницаемости пленочной изоляция, определив из справочной литературы [2] значения ϵ пленки.

$$\epsilon_{п} := 3.0 \text{ Диэлектрическая проницаемость поликарбонатной пленки}$$

2.3.3. В соответствии с прототипом заданного конденсатора зададим размеры корпуса (высоту H , ширину B и длину L), зазор от крышки Δ , толщину стенок $\Delta_{мет}$ и выберем вертикальную компоновку расположения секций со скрытой фольгой а) и горизонтальную компоновку с выступающей фольгой б)

$$H := 0.3 \text{ [м]} \quad B := 0.16 \text{ [м]} \quad L := 0.3 \text{ м}$$

$$\Delta_{мет} := 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ [м]} \quad \Delta := 0.06 \text{ [м]} \quad \Delta_c := 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

а) для секций со скрытой фольгой

$$b_{сск} := B - \Delta - 2\Delta_{мет} - 2\Delta_{изк} \quad b_{сск} = 0.098 \text{ м}$$

$$h_{сск} := H - 2\Delta_{мет} - 2\Delta_{изк} \quad h_{сск} = 0.298 \text{ м}$$

$$\text{Примем:} \quad b_{сск} := 100 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad h_{сск} := 300 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

2.3.4. Рассчитаем емкость секции и, исходя из заданной емкости конденсатора, определим число параллельных секций.

$$k_3 := 0.9 \quad \Delta\phi := 12 \cdot 10^{-6} \text{ (м)} \quad \epsilon_0 := 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$$

Путем подбора значения Δc сравниваем величины $C_{с1}$ и $C_{с2}$

$$\Delta_{сск} := 6.85 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$C_{сск1} := \frac{\epsilon_{п} \cdot \epsilon_0 \cdot (b_{сск} - 2 \cdot \Delta l) \cdot \left(h_{сск} - \Delta c + \frac{\pi}{4} \cdot \Delta_{сск} \cdot k_3 \right) \cdot \Delta_{сск} \cdot k_3^2}{d \cdot (d + \Delta\phi)}$$

$$C_{сск1} = 5.405 \times 10^{-7}$$

Число параллельных секций

$$n_{пар} := \frac{C_{к-пос}}{C_{сск1}} \quad n_{пар} = 4.996 \quad \text{Примем } n_{пар} := 5$$

$$C_{сск2} := C_{к-пос} \cdot \frac{n_{пар}}{n_{пар}} \quad C_{сск2} = 5.4 \times 10^{-7} \text{ (Ф)}$$

$$\Delta_{сск} := 10.26 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\Delta_{св} := 11.0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

2.3.5. Скомпануем секции в пакет, рассчитываем его размеры и габариты конденсатора

Размеры пакета

$$h_{пск} := h_{сск} + 2 \cdot \Delta_{изк} \quad h_{пск} = 0.301 \text{ м}$$

$$b_{пск} := b_{сск} + 2 \cdot \Delta_{изк} \quad b_{пск} = 0.101 \text{ м}$$

$$l_{пск} := n_{пар} \cdot n_{пос} \cdot \Delta_{сск} + n_{пар} \cdot n_{пос} \cdot \Delta_{изс} + 2 \cdot \Delta_{изк} \quad l_{пск} = 0.611 \text{ м}$$

Размеры корпуса

$$H_{кск} := b_{пск} + \Delta + 2 \cdot \Delta_{мет} \quad H_{кск} = 0.162 \text{ м}$$

$$B_{кск} := h_{пск} + 2 \cdot \Delta_{мет} \quad B_{кск} = 0.302 \text{ м}$$

$$L_{кск} := l_{пск} + 2 \cdot \Delta_{мет} \quad L_{кск} = 0.612 \text{ м}$$

3. Тепловой расчет конденсатора.

3.1. Для проведения теплового расчета конденсатора необходимо знать температурную зависимость $\text{tg}\delta$ для выбранной комбинированной изоляции. В случае приближенных расчетов можно принять, что эта зависимость имеет экспоненциальный характер. Чтобы построить такую зависимость, зададим два значения $\text{tg}\delta$ отдельных компонентов при разных температурах.

3.1.1. Произведем расчет диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь для пленочной изоляции при температуре 20 °С

$$\epsilon_{п} := 3.0 \quad \text{Диэлектрическая проницаемость полипропиленовой пленки} \quad \gamma_{п} := 1200 \quad \text{Плотность пленки}$$

$$\text{tg}\delta := 0.00008 \quad \text{тангенс угла диэлектрических потерь пленки}$$

$\epsilon_{ж} := 4.5$ Диэлектрическая проницаемость пропитывающей жидкости

$tg_{ж} := 0.001$ тангенс угла диэлектрических пропитывающей жидкости

3.1.2. Произведем расчет диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь для пленочной изоляции при температуре 80 °С

$\epsilon_{п} := 3.0$ Диэлектрическая проницаемость полипропиленовой пленки $\gamma_{п} := 1200$ Плотность пленки

$tg\delta_{п} := 0.0001$ тангенс угла диэлектрических потерь пленки при 80 °С

$\epsilon_{ж} := 4.5$ Диэлектрическая проницаемость пропитывающей жидкости

$tg\delta_{ж} := 0.05$ тангенс угла диэлектрических пропитывающей жидкости

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

$$a_{п} := \frac{\ln(tg_{п}) - \ln(tg\delta_{п})}{20 - 80}$$

$$a_{п} = 3.719 \times 10^{-3}$$

$$tg\delta_{0п} := \frac{tg_{п}}{e^{a_{п} \cdot 80}}$$

$$tg\delta_{0п} = 5.941 \times 10^{-5}$$

$$tg\delta_{п1n} := tg\delta_{0п} \cdot e^{a_{п} \cdot T1_n}$$

$$tg_{п} = 8 \times 10^{-5}$$

$$tg\delta_{п} = 1 \times 10^{-4}$$

$$T1 := \begin{pmatrix} 20 \\ 40 \\ 60 \\ 80 \\ 100 \\ 120 \\ 140 \\ 160 \\ 180 \\ 200 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{ORIGIN} := 1 \\ n := 1..10 \\ i := 0..10 \end{array}$$

$$a_{ж} := \frac{\ln(tg_{ж}) - \ln(tg\delta_{ж})}{20 - 80}$$

$$a_{ж} = 0.065$$

$$tg\delta_{0ж} := \frac{tg_{ж}}{e^{a_{ж} \cdot 80}}$$

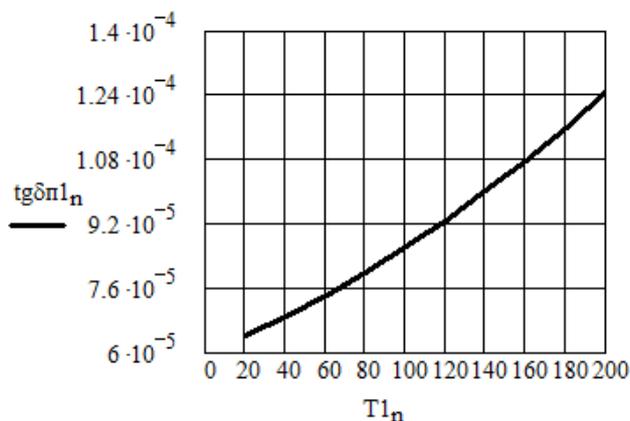
$$tg\delta_{0ж} = 5.429 \times 10^{-6}$$

$$tg\delta_{ж1n} := tg\delta_{0ж} \cdot e^{a_{ж} \cdot T1_n}$$

$$tg\delta_{жп1n} := tg\delta_{0п} \cdot e^{a_{п} \cdot T1_n}$$

$T1_n =$ $tg\delta_{п1n} =$

20	$6.4 \cdot 10^{-5}$
40	$6.894 \cdot 10^{-5}$
60	$7.427 \cdot 10^{-5}$
80	$8 \cdot 10^{-5}$
100	$8.618 \cdot 10^{-5}$
120	$9.283 \cdot 10^{-5}$
140	$1 \cdot 10^{-4}$
160	$1.077 \cdot 10^{-4}$
180	$1.16 \cdot 10^{-4}$
200	$1.25 \cdot 10^{-4}$



Т.к. в качестве изоляции взята только пленка, то рассчитывать тангенс угла диэлектрических потерь с учетом объемных долей не имеет смысла.

3.2. Тепловой расчет проведем со скрытой фольгой. Для проведения теплового расчета зададим 4 значения температуры в центральной точке секции (рисунок 1.1)

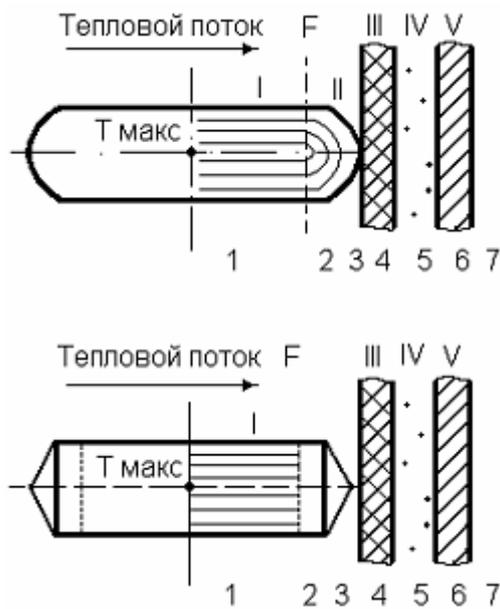


Рисунок 1.1 - Расположение элементов конденсатора относительно теплового потока F:

- а) для секций со скрытой фольгой;
 б) для секций с выступающей фольгой
 I – участок параллельного расположения слоев;
 II – участок перпендикулярного расположения слоев;
 III – изоляция от корпуса;
 IV – масляный промежуток;
 V – стенка корпуса

$$T1 := \begin{pmatrix} 20 \\ 40 \\ 60 \\ 80 \end{pmatrix} \quad \text{tg}\delta_{\text{пл}} := \text{tg}\delta_{0\text{пл}} \cdot e^{\alpha_{\text{пл}} \cdot T1} \quad C_c := C_{\text{сск1}} \quad \text{ORIGIN} := 1$$

$$C_c = 5.405 \times 10^{-7} \quad i := 1..4$$

3.2.1. Находим диэлектрические потери

$$\omega := \frac{2\pi}{\tau 1}$$

$$P_{\text{дск}} := \frac{U_c^2 \cdot \omega \cdot C_{\text{сск1}} \cdot \text{tg}\delta_{\text{пл}}}{8} \cdot \frac{0.78 \cdot \tau 1^2}{\tau 2^2} \quad P_{\text{дск}} = \begin{pmatrix} 3.085 \times 10^{-3} \\ 3.323 \times 10^{-3} \\ 3.579 \times 10^{-3} \\ 3.856 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

3.2.2. Находим потери в обкладках, принимая:

$$T0 := 20 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{выст} := 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\rho_0 := 28 \cdot 10^{-9} \text{ Ом м} \quad \alpha_{\rho\phi} := 0.0045 \text{ 1/град}$$

$$k_3 := 0.9$$

Активная длина обкладки

$$L_{\text{аск}} := \frac{\Delta_{\text{сск}} \cdot k_3}{2 \cdot (d + \Delta\phi)} \cdot \left(h_{\text{сск}} - \Delta_{\text{сск}} + \frac{3.14}{4} \cdot \Delta_{\text{сск}} \cdot k_3 \right) \quad L_{\text{аск}} = 14.904 \text{ м}$$

3.2.3. Находим потери в обкладках $R_{фск} := \dots$

$$R_{фск} := \frac{1}{6} \cdot \left(\frac{U_c \cdot \omega \cdot C_{сск1}}{n_{ск}} \right)^2 \cdot \frac{L_{аск}}{(b_{сск} - 2 \cdot \Delta l) \cdot \Delta \phi} \cdot \rho_0 \cdot [1 + \alpha_{\rho \phi} \cdot (T_1 - T_0)]$$

3.2.4. Тепловыделение в секции

$$R_{сск} := R_{дск} + R_{фск} \quad R_{сск} = \begin{pmatrix} 0.087 \\ 0.095 \\ 0.103 \\ 0.111 \end{pmatrix}$$

3.2.5. Удельные тепловыделения в секции

$$q_{сск} := \frac{R_{сск}}{(b_{сск} - 2 \cdot \Delta l) \cdot h_{сск} \cdot \Delta c_{сск}} \quad q_{сск} = \begin{pmatrix} 298.458 \\ 325.185 \\ 351.974 \\ 378.831 \end{pmatrix} \text{ Вт/м}^3$$

3.3. Расчет температуроперепадов на отдельных участках

Примем следующие характеристики:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{ж} &:= 0.24 \text{ теплопроводность пропитывающей жидкости} \\ \lambda_{п} &:= 0.19 \text{ теплопроводность пленки} \\ \lambda_{\phi} &:= 200 \text{ теплопроводность} \\ &\quad \text{алюминиевой фольги} \end{aligned} \right\} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$$

3.3.1. Найдем эквивалентную теплопроводность на 1-ом участке когда слои последовательны

$$\lambda_{экв1} := \frac{\lambda_{п} \cdot n_1 \cdot \delta_1 + \lambda_{\phi} \cdot \Delta \phi}{n_1 \cdot \delta_1 + \Delta \phi} \quad \lambda_{экв1} = 26.252 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$$

3.3.2. Перепад температуры на I участке секции

а) со скрытой фольгой

$$\Delta T_{1ск} := q_{сск} \cdot \frac{(h_{сск} - \Delta c_{сск})^2}{8 \cdot \lambda_{экв1}} \quad \Delta T_{1ск} = \begin{pmatrix} 0.119 \\ 0.13 \\ 0.141 \\ 0.151 \end{pmatrix} \text{ град}$$

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

тепловой поток пересекает слои перпендикулярно

$$\lambda_{\text{экв}2\text{ск}} := \frac{n1 \cdot \delta1 + \Delta\phi}{\frac{n1 \cdot \delta1}{\lambda_{\text{п}}} + \frac{\Delta\phi}{\lambda_{\text{ф}}}} \quad \lambda_{\text{экв}2\text{ск}} = 0.218 \frac{\text{вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$$

3.3.4. Перепад температуры на II участке

$$\Delta T_{2\text{ск}} := q_{\text{сск}} \cdot \frac{\Delta_{\text{сск}}^2}{8 \cdot \lambda_{\text{экв}2\text{ск}}} \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot (h_{\text{сск}} - \Delta_{\text{сск}})}{\Delta_{\text{сск}}} \right] \quad \Delta T_{2\text{ск}} = \begin{pmatrix} 1.033 \\ 1.126 \\ 1.219 \\ 1.312 \end{pmatrix} \text{град}$$

3.3.6. Температура на поверхности секции

$$T_{\text{ск}} := T1 - \Delta T_{1\text{ск}} - \Delta T_{2\text{ск}} \quad T_{\text{ск}} = \begin{pmatrix} 18.847 \\ 38.744 \\ 58.641 \\ 78.537 \end{pmatrix} \text{град}$$

3.3.7. Тепловыделение в изоляции от корпуса

$$\Delta_{\text{ж}} := 1 \cdot 10^{-3} \quad \text{tg}\delta_{0\text{ж}} = 5.429 \times 10^{-6}$$

$$a_{\text{ж}} = 0.065$$

$$\text{tg}\delta_{\text{жск}} := \text{tg}\delta_{0\text{ж}} \cdot e^{a_{\text{ж}} \cdot T_{\text{ск}}}$$

$$q_{4\text{ск}} := \left(\frac{U_{\text{н}} \cdot 1000 \cdot \varepsilon_{\text{ж}}}{\varepsilon_{\text{ж}} \cdot \Delta_{\text{изк}} + \varepsilon_{\text{п}} \cdot \Delta_{\text{ж}}} \right)^2 \cdot \omega \cdot \varepsilon_{\text{п}} \cdot \varepsilon_{0} \cdot \Delta_{\text{изк}} \cdot \text{tg}\delta_{\text{жск}} \quad q_{4\text{ск}} = \begin{pmatrix} 1.13 \\ 4.137 \\ 15.137 \\ 55.388 \end{pmatrix}$$

3.3.8. Найдем эквивалентную теплопроводность в изоляции от корпуса

$$\lambda_{\text{эквкор}} := \frac{\Delta_{\text{изк}} + \Delta\phi}{\frac{\Delta_{\text{изк}}}{\lambda_{\text{п}}} + \frac{\Delta\phi}{\lambda_{\text{ф}}}} \quad \lambda_{\text{эквкор}} = 0.194 \frac{\text{вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$$

3.3.9. Перепад температуры в изоляции от корпуса

$$\Delta T_{4\text{ск}} := \left(q_{\text{сск}} \cdot \frac{h_{\text{сск}}}{2} + \frac{q_{4\text{ск}}}{2} \right) \cdot \frac{\Delta_{\text{изк}}}{\lambda_{\text{эквкор}}} \quad \Delta T_{4\text{ск}} = \begin{pmatrix} 0.133 \\ 0.149 \\ 0.177 \\ 0.248 \end{pmatrix} \text{ град}$$

3.3.10. Температура на поверхности изоляции от корпуса

$$T_{\text{иск}} := T_1 - \Delta T_{1\text{ск}} - \Delta T_{2\text{ск}} - \Delta T_{4\text{ск}} \quad T_{\text{иск}} = \begin{pmatrix} 18.847 \\ 38.744 \\ 58.641 \\ 78.537 \end{pmatrix} \text{ град}$$

3.3.11. Тепловыделение в зазоре между изоляцией и корпусом (в масляной прослойке). В качестве прослойки возьмем конденсаторное масло.

$$tg\delta_{\text{жск}} := tg\delta_{0\text{ж}} \cdot e^{a_{\text{ж}} \cdot T_{\text{иск}}} \\ q_{5\text{ск}} := \left(\frac{U_{\text{н}} \cdot 1000 \cdot \varepsilon_{\text{п}}}{\varepsilon_{\text{ж}} \cdot \Delta_{\text{изк}} + \varepsilon_{\text{п}} \cdot \Delta_{\text{ж}}} \right)^2 \cdot \omega \cdot \varepsilon_{\text{ж}} \cdot \varepsilon_0 \cdot \Delta_{\text{ж}} \cdot tg\delta_{\text{жск}} \quad q_{5\text{ск}} = \begin{pmatrix} 1.311 \\ 4.791 \\ 17.5 \\ 63.741 \end{pmatrix} \text{ Вт/м}^3$$

3.3.12. Перепад температуры в масляной прослойке с учетом конвекции

$$\varepsilon_{\text{конв}} := 1 \quad \lambda_{\text{экв5}} := \lambda_{\text{п}} \cdot \varepsilon_{\text{конв}} \quad \lambda_{\text{экв5}} = 0.19 \\ \Delta T_{5\text{ск}} := \left(q_{\text{сск}} \cdot \frac{h_{\text{сск}}}{2} + q_{4\text{ск}} + \frac{q_{5\text{ск}}}{2} \right) \cdot \frac{\Delta_{\text{ж}}}{\lambda_{\text{экв5}}} \quad \Delta T_{5\text{ск}} = \begin{pmatrix} 0.245 \\ 0.291 \\ 0.404 \\ 0.758 \end{pmatrix} \text{ град}$$

3.3.13. Тепловыделение в конденсаторе найдем пренебрегая потерями в соединительных проводах.

$$S_{\text{кск}} := 2 \cdot H_{\text{кск}} \cdot (B_{\text{кск}} + L_{\text{кск}}) \quad S_{\text{кск}} = 0.297 \text{ м}^2 \\ Q_{\text{ск}} := P_{\text{сск}} \cdot \eta_{\text{пос}} \cdot \eta_{\text{пар}} + q_{4\text{ск}} \cdot S_{\text{кск}} + q_{5\text{ск}} \cdot S_{\text{кск}} \quad Q_{\text{ск}} = \begin{pmatrix} 4.643 \\ 6.917 \\ 14.3 \\ 40.302 \end{pmatrix}$$

3.3.14. Перепад температуры в стенке корпуса

$$\lambda_{ст} := 54 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{град}} \quad \Delta_{мет} = 5 \times 10^{-4}$$

$$\Delta T_{6ск} := \frac{Q_{ск} \cdot \Delta_{мет}}{S_{ск} \cdot \lambda_{ст}} \quad \Delta T_{6ск} = \begin{pmatrix} 1.45 \times 10^{-4} \\ 2.16 \times 10^{-4} \\ 4.465 \times 10^{-4} \\ 1.258 \times 10^{-3} \end{pmatrix} \text{ град}$$

3.3.15. Температура на поверхности корпуса

$$T_{кск} := T_1 - \Delta T_{1ск} - \Delta T_{2ск} - \Delta T_{4ск} - \Delta T_{6ск} \quad T_{кск} = \begin{pmatrix} 18.714 \\ 38.595 \\ 58.463 \\ 78.287 \end{pmatrix} \text{ рад}$$

3.4. Найдем температуроперепад в воздухе используя критерии теплового подобия

3.4.1. Зададим перепад температуры в воздухе $\Delta t_{зад1} := 5$ $\Delta t_{зад2} := 10$ град

$$T_{i1ск} := T_{кск} - \Delta t_{зад1} \quad T_{i1ск} = \begin{pmatrix} 13.714 \\ 33.595 \\ 53.463 \\ 73.287 \end{pmatrix} \text{ град}$$

$$T_{i2ск} := T_{кск} - \Delta t_{зад2} \quad T_{i2ск} = \begin{pmatrix} 8.714 \\ 28.595 \\ 48.463 \\ 68.287 \end{pmatrix} \text{ рад}$$

3.4.2. При этих температурах найдем характеристики воздуха (коэффициент теплопроводности, кинематическую вязкость и коэффициент Прандтля), используя эмпирические уравнения

$$\lambda_{1ск} := (2.44 + 0.0077 \cdot T_{i1ск}) \cdot 0.01 \quad \lambda_{1ск} = \begin{pmatrix} 0.025 \\ 0.027 \\ 0.029 \\ 0.03 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_{2ск} := (2.44 + 0.0077 \cdot T_{i2ск}) \cdot 0.01 \quad \lambda_{2ск} = \begin{pmatrix} 0.025 \\ 0.027 \\ 0.028 \\ 0.03 \end{pmatrix}$$

$$v_{1ск} := (13.28 + 0.0984 \cdot T_{i1ск}) \cdot 0.00 \quad v_{1ск} = \begin{pmatrix} 1.463 \times 10^{-5} \\ 1.659 \times 10^{-5} \\ 1.854 \times 10^{-5} \\ 2.049 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

$$v_{2ск} := (13.28 + 0.0984 \cdot T_{i2ск}) \cdot 0.00 \quad v_{2ск} = \begin{pmatrix} 1.414 \times 10^{-5} \\ 1.609 \times 10^{-5} \\ 1.805 \times 10^{-5} \\ 2 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

$$Pr_{1ск} := 0.707 - 0.0000525 \cdot Ti_{1ск}$$

$$Pr_{2ск} := 0.707 - 0.0000525 \cdot Ti_{2ск}$$

$$Pr_{1ск} = \begin{pmatrix} 0.706 \\ 0.705 \\ 0.704 \\ 0.703 \end{pmatrix} \quad Pr_{2ск} = \begin{pmatrix} 0.707 \\ 0.705 \\ 0.704 \\ 0.703 \end{pmatrix}$$

Примеч: $g := 9.8$ $\beta := \frac{1}{273}$ $Pr_c := 0.7$ $L_{ск} := H_{ск}$

$$Gr_{1ск} := g \cdot \beta \cdot \frac{L_{ск}^3}{\nu_{1ск}^2} \cdot \Delta t_{зад1}$$

$$Gr_{2ск} := g \cdot \beta \cdot \frac{L_{ск}^3}{\nu_{2ск}^2} \cdot \Delta t_{зад2}$$

$$Gr_{1ск} = \begin{pmatrix} 3.575 \times 10^6 \\ 2.781 \times 10^6 \\ 2.226 \times 10^6 \\ 1.822 \times 10^6 \end{pmatrix} \quad Gr_{2ск} = \begin{pmatrix} 7.656 \times 10^6 \\ 5.908 \times 10^6 \\ 4.697 \times 10^6 \\ 3.826 \times 10^6 \end{pmatrix}$$

3.4.3. Для определения критерия Нусельта найдем коэффициенты C и n, характеризующие характер течения газа, в соответствие 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

$$Gr_{1скi} \cdot Pr_{1скi} =$$

2.525·10 ⁶
1.961·10 ⁶
1.567·10 ⁶
1.281·10 ⁶

$$Gr_{2скi} \cdot Pr_{2скi} =$$

5.409·10 ⁶
4.168·10 ⁶
3.309·10 ⁶
2.691·10 ⁶

$$Nu_{1скi} := 0.76 \cdot (Gr_{1скi} \cdot Pr_{1скi})^{0.25} \cdot \left(\frac{Pr_{1скi}}{Pr_c} \right)^{0.25}$$

$$Nu_{2скi} := 0.76 \cdot (Gr_{2скi} \cdot Pr_{2скi})^{0.25} \cdot \left(\frac{Pr_{2скi}}{Pr_c} \right)^{0.25}$$

$$Nu_{1скi} =$$

30.363
28.495
26.931
25.598

$$Nu_{2скi} =$$

36.737
34.407
32.466
30.819

3.4.4. Найдем коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_{к1ск_1} := \frac{Nu_{1ск_1} \cdot \lambda_{1ск_1}}{L_{ск}}$$

$$\alpha_{к1ск_1} =$$

4.767
4.743
4.736
4.743

$$\alpha_{к2ск_1} := \frac{Nu_{2ск_1} \cdot \lambda_{2ск_1}}{L_{ск}}$$

$$\alpha_{к2ск_1} =$$

5.681
5.645
5.633
5.637

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

$$S_{бокск} := 2 \cdot H_{ск} \cdot (B_{ск} + L_{ск}) + B_{ск} \cdot L_{ск} \quad S_{бокск} = 0.482$$

$$\Delta T_{пол1ск_1} := \frac{Q_{ск_1}}{\alpha_{к1ск_1} \cdot S_{бокск}}$$

$$\Delta T_{пол1ск_1} =$$

2.023
3.029
6.269
17.645

$$\Delta T_{пол2ск_1} := \frac{Q_{ск_1}}{\alpha_{к2ск_1} \cdot S_{бокск}}$$

$$\Delta T_{пол2ск_1} =$$

1.697
2.545
5.272
14.846

град

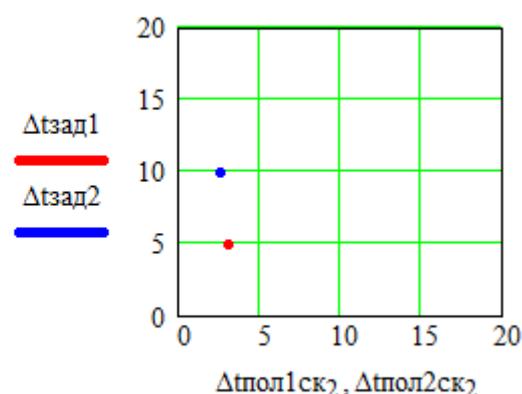
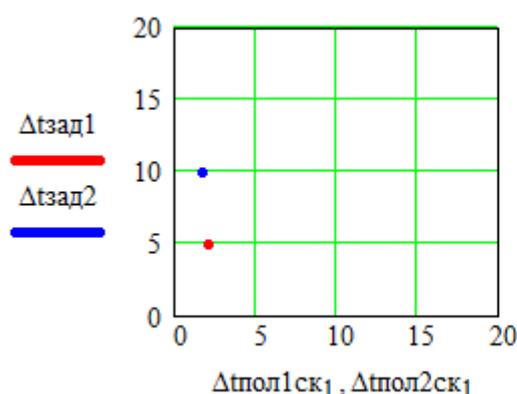
3.4.6. Для графического определения $\Delta T_{воз}$ построим график зависимости $\Delta T_{зад}$ от $\Delta T_{пол}$

$$\Delta 1_{ск_1} := \frac{\Delta T_{пол1ск_1} - \Delta T_{пол2ск_1}}{\Delta T_{зад1} - \Delta T_{зад2}}$$

$$\Delta 2_{ск_1} := \Delta T_{пол1ск_1} - \Delta T_{зад1} \cdot \Delta 1_{ск_1}$$

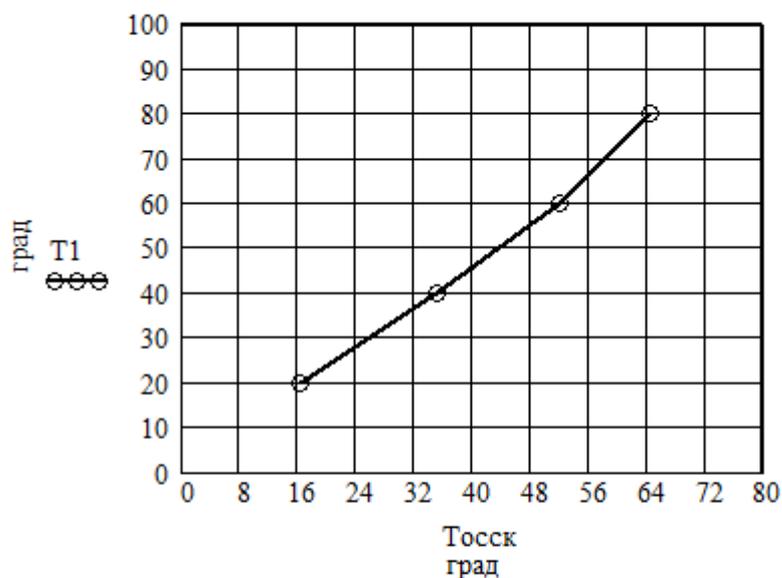
$$\Delta T_{возск_1} := \frac{\Delta 2_{ск_1}}{1 - \Delta 1_{ск_1}}$$

$$\Delta T_{возск} = \begin{pmatrix} 2.204 \\ 3.203 \\ 6.058 \\ 13.107 \end{pmatrix} \text{ град}$$



3.4.7. Построим график тепловой устойчивости

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



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

$$T_{\text{доп}} := 140 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{\text{макс}} := 52 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{при } T = 45 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Вывод: Так как $T_{\text{макс}}$ менее $T_{\text{доп}}$, то условие тепловой устойчивости выполняется

4. Расчет срока службы.

4.1. Для проведения расчета примем следующие параметры изоляции:

$D := 5 \cdot 10^{-19}$	- энергия диссоциации химической связи:
$A := 10 \cdot 10^{-29}$	- постоянный коэффициент, характеризующий материал диэлектрика
$b := 0.002$	- температурны коэффициент
$v_0 := 2 \cdot 10^{-7}$	- элементарный объем, содержащий хотя бы одну неоднородность
$K := 1.38 \cdot 10^{-23}$	- постоянная Больцмана
$\tau_0 := 1 \cdot 10^{-13}$	- время релаксации:
$v := 6$	- коэффициент неоднородности
$p := 0.1$	- концентрация неоднородностей
$k := n_{\text{пос}} \cdot n_{\text{пар}}$	- количество секций
$P_{\tau} := 0.9$	- заданная вероятность безотказной работы конденсатора
$U_{и} := 80000$	- амплитуда перенапряжений В
$\sigma_{и} := 5000$	- среднеквадратичное отклонение
$N := 10000$	- количество импульсов перенапряжений
$t_{и} := 20 \cdot 10^{-6}$	- длительность импульса перенапряжений
$t_{г} := 31.536 \cdot 10^6$	- продолжительность года

4.2. Найдем вероятность безотказной работы одной секции при заданной вероятности безотказной работы P_{τ} :

$$P_n := P_{\tau}^{\frac{1}{k}} \quad P_n = 0.998$$

4.3. Методом подбора найдем коэффициент (y), принимая что $F(y) = P_n$.

Коэффициент неоднородности поля η примем равным 1.

$$v := (b_{\text{сск}} - 2 \cdot \Delta l) \cdot b_{\text{сск}} \cdot \Delta c v \quad v = 1.043 \times 10^{-4} \quad \eta := 1$$

$$F_y := \left(1 - e^{1.67 \cdot y \cdot \ln(1.3 \cdot p)}\right)^{\frac{v}{v_0 \cdot \eta \cdot y}} \quad F_y = 0.999 \quad y := 3.58$$

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

$$\beta := \frac{v}{1 + (v - 1) \cdot \frac{1}{y^2 - 1} \cdot \left(\frac{y}{\sqrt{y^2 - 1}} \cdot \ln(y + \sqrt{y^2 - 1})\right)} \quad \beta = 3.228$$

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

$$t_i := \begin{pmatrix} 5 \cdot 10^6 \\ 19.5 \cdot 10^6 \\ 11 \cdot 10^6 \\ 6 \cdot 10^6 \end{pmatrix} \quad T_{\text{ос}} := \begin{pmatrix} 253 \\ 273 \\ 293 \\ 313 \end{pmatrix}$$

4.7 Перенапряжения, являющиеся случайными величинами, заменим переменными

$$U_{\max} := U_{\text{и}} + 4 \cdot \sigma_{\text{и}} \quad U_{\max} = 1 \times 10^5 \quad \text{В}$$

$$U_{\min} := U_{\text{и}} - 4 \cdot \sigma_{\text{и}} \quad U_{\min} = 6 \times 10^4 \quad \text{В}$$

4.8 Число интервалов

$$N := \frac{U_{\max} - U_{\min}}{\sigma_{\text{и}}} \quad N = 8$$

4.9. Ширина интервала

$$\Delta U := \frac{U_{\max} - U_{\min}}{N} \quad \Delta U = 5 \times 10^3 \quad \text{В}$$

ORIGIN := 0

j := 1..14

4.10. 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	$9.5 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$	$9.75 \cdot 10^4$	1.5	2	0.00023
2	$9 \cdot 10^4$	$9.5 \cdot 10^4$	$9.25 \cdot 10^4$	1	1.5	0.00135
3	$8.5 \cdot 10^4$	$9 \cdot 10^4$	$8.75 \cdot 10^4$	0.5	1	0.00621
4	$8 \cdot 10^4$	$8.5 \cdot 10^4$	$8.25 \cdot 10^4$	0	0.5	0.02275
5	$7.5 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^4$	$7.75 \cdot 10^4$	-0.5	0	0.06681
6	$7 \cdot 10^4$	$7.5 \cdot 10^4$	$7.25 \cdot 10^4$	-1	-0.5	0.15866
7	$6.5 \cdot 10^4$	$7 \cdot 10^4$	$6.75 \cdot 10^4$	-1.5	-1	0.30854
8	$6 \cdot 10^4$	$6.5 \cdot 10^4$	$6.25 \cdot 10^4$	-2	-1.5	0.50000
9	$5.5 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$	$5.75 \cdot 10^4$	-2.5	-2	0.69146
10	$5 \cdot 10^4$	$5.5 \cdot 10^4$	$5.25 \cdot 10^4$	-3	-2.5	0.84134
11	$4.5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	$4.75 \cdot 10^4$	-3.5	-3	0.93319
12	$4 \cdot 10^4$	$4.5 \cdot 10^4$	$4.25 \cdot 10^4$	-4	-3.5	0.97725
13	$3.5 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	$3.75 \cdot 10^4$	-4.5	-4	0.99379
14	$3 \cdot 10^4$	$3.5 \cdot 10^4$	$3.25 \cdot 10^4$	-5	-4.5	0.99865
						0.99977

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

$$\Delta F_j := FU_j - FU_{j-1} \quad \text{Ерабс} = 2.37 \times 10^6 \quad \frac{\text{В}}{\text{м}}$$

$$U_{\text{с}} = 1.706 \times 10^3 \quad \text{В}$$

$$\tau_{6j} := \frac{\tau_0 \cdot N \cdot \Delta F_j}{U_c} \quad \eta E_j := E_{рабс} \cdot \frac{U_{спj}}{U_c}$$

$FU_j =$	$FU_{j-1} =$	$\Delta F_j =$	$\tau_{6j} =$	$\eta E_j =$
1.35·10 ⁻³	2.3·10 ⁻⁴	0.0011	5.682·10 ⁻¹⁵	1.354·10 ⁸
6.21·10 ⁻³	1.35·10 ⁻³	0.0049	2.466·10 ⁻¹⁴	1.285·10 ⁸
0.0228	6.21·10 ⁻³	0.0165	8.392·10 ⁻¹⁴	1.215·10 ⁸
0.0668	0.0228	0.0441	2.235·10 ⁻¹³	1.146·10 ⁸
0.1587	0.0668	0.0919	4.66·10 ⁻¹³	1.076·10 ⁸
0.3085	0.1587	0.1499	7.604·10 ⁻¹³	1.007·10 ⁸
0.5	0.3085	0.1915	9.714·10 ⁻¹³	9.375·10 ⁷
0.6915	0.5	0.1915	9.714·10 ⁻¹³	8.681·10 ⁷
0.8413	0.6915	0.1499	7.604·10 ⁻¹³	7.986·10 ⁷
0.9332	0.8413	0.0918	4.66·10 ⁻¹³	7.292·10 ⁷
0.9772	0.9332	0.0441	2.235·10 ⁻¹³	6.597·10 ⁷
0.9938	0.9772	0.0165	8.392·10 ⁻¹⁴	5.903·10 ⁷
0.9986	0.9938	0.0049	2.466·10 ⁻¹⁴	5.208·10 ⁷
0.9998	0.9986	0.0011	5.682·10 ⁻¹⁵	4.514·10 ⁷

4.12 Рассчитаем вероятность разрыва химической связи в диэлектрике под действием рабочей напряженности поля $E_{раб}$ и с учетом перенапряжений

При рабочей напряженности поля при температуре

$$T1 := 251$$

$$x1 := \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T1} \cdot \beta \cdot \eta \cdot E_{рабс}$$

$$x1 = 9.262 \times 10^{-4}$$

$$\phi x1 := \sqrt{1 - 2 \cdot x1} - x1 \cdot \ln \left(\frac{1}{x1} + \frac{1}{x1} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot x1} - 1 \right)$$

$$\phi x1 = 0.992$$

$$q1 := \frac{1}{\tau_0} \cdot e^{\frac{-D \cdot \phi x1}{2 \cdot K \cdot T1}} \quad q1 = 8.066 \times 10^{-19}$$

С учетом перенапряжений

$$x01_j := \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T1} \cdot \beta \cdot \eta E_j$$

$$\phi x01_j := \sqrt{1 - 2 \cdot x01_j} - x01_j \cdot \ln \left(\frac{1}{x01_j} + \frac{1}{x01_j} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot x01_j} - 1 \right) \quad q01_j := \frac{1}{\tau_0} \cdot e^{\frac{-D \cdot \phi x01_j}{2 \cdot K \cdot T1}}$$

$x_{01j} =$	$\phi_{x01j} =$	$\tau_{6j} =$	$q_{01j} =$
0.053	0.756	5.6824·10 ⁻¹⁵	1.9666·10 ⁻¹¹
0.05	0.766	2.4658·10 ⁻¹⁴	9.707·10 ⁻¹²
0.047	0.776	8.3917·10 ⁻¹⁴	4.738·10 ⁻¹²
0.045	0.786	2.2354·10 ⁻¹³	2.2856·10 ⁻¹²
0.042	0.796	4.6601·10 ⁻¹³	1.0889·10 ⁻¹²
0.039	0.807	7.6043·10 ⁻¹³	5.1197·10 ⁻¹³
0.037	0.817	9.7139·10 ⁻¹³	2.3735·10 ⁻¹³
0.034	0.828	9.7139·10 ⁻¹³	1.0839·10 ⁻¹³
0.031	0.839	7.6043·10 ⁻¹³	4.8697·10 ⁻¹⁴
0.028	0.851	4.6601·10 ⁻¹³	2.1497·10 ⁻¹⁴
0.026	0.862	2.2354·10 ⁻¹³	9.3091·10 ⁻¹⁵
0.023	0.874	8.3917·10 ⁻¹⁴	3.9466·10 ⁻¹⁵
0.02	0.886	2.4658·10 ⁻¹⁴	1.634·10 ⁻¹⁵
0.018	0.899	5.6824·10 ⁻¹⁵	6.5871·10 ⁻¹⁶

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

$$S1 = 2.542 \times 10^{-24}$$

При рабочей напряженности поля при температуре

$$x_2 := \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T_2} \cdot \beta \cdot (\eta \cdot E_{рабс})$$

$$\phi_{x2} := \sqrt{1 - 2 \cdot x_2} - x_2 \cdot \ln \left(\frac{1}{x_2} + \frac{1}{x_2} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot x_2} - 1 \right)$$

$$q_2 := \frac{1}{\tau_0} \cdot e^{\frac{-D \cdot \phi_{x2}}{2 \cdot K \cdot T_2}}$$

$$T_2 := 275$$

$$x_2 = 8.827 \times 10^{-4}$$

$$\phi_{x2} = 0.992$$

$$q_2 = 4.08 \times 10^{-16}$$

С учетом перенапряжений

$$x_{02j} := \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T_2} \cdot \beta \cdot \eta E_j$$

$$\phi_{x02j} := \sqrt{1 - 2 \cdot x_{02j}} - x_{02j} \cdot \ln \left(\frac{1}{x_{02j}} + \frac{1}{x_{02j}} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot x_{02j}} - 1 \right), \tau_{02j} := \frac{1}{\tau_0} \cdot e^{\frac{-D \cdot \phi_{x02j}}{2 \cdot K \cdot T_2}}$$

$x_{02j} =$	$\phi_{x02j} =$	$\tau_{6j} =$	$q_{02j} =$
0.05	0.7652	5.6824·10 ⁻¹⁵	1.2795·10 ⁻⁹
0.048	0.7747	2.4658·10 ⁻¹⁴	6.8631·10 ⁻¹⁰
0.045	0.7843	8.3917·10 ⁻¹⁴	3.6459·10 ⁻¹⁰
0.043	0.794	2.2354·10 ⁻¹³	1.9172·10 ⁻¹⁰
0.04	0.804	4.6601·10 ⁻¹³	9.9728·10 ⁻¹¹
0.038	0.8141	7.6043·10 ⁻¹³	5.1285·10 ⁻¹¹
0.035	0.8243	9.7139·10 ⁻¹³	2.6053·10 ⁻¹¹
0.032	0.8348	9.7139·10 ⁻¹³	1.3063·10 ⁻¹¹
0.03	0.8455	7.6043·10 ⁻¹³	6.4577·10 ⁻¹²
0.027	0.8564	4.6601·10 ⁻¹³	3.144·10 ⁻¹²
0.025	0.8676	2.2354·10 ⁻¹³	1.5053·10 ⁻¹²
0.022	0.8791	8.3917·10 ⁻¹⁴	7.0756·10 ⁻¹³
0.019	0.8909	2.4658·10 ⁻¹⁴	3.2582·10 ⁻¹³
0.017	0.903	5.6824·10 ⁻¹⁵	1.4659·10 ⁻¹³

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

$$S2 = 2.279 \times 10^{-22}$$

При рабочей напряженности поля при температуре

$$T3 := 301$$

$$x3 := \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T3} \cdot \beta \cdot (\eta \cdot E_{рабс})$$

$$x3 = 8.38 \times 10^{-4}$$

$$\phi_{x3} := \sqrt{1 - 2 \cdot x3} - x3 \cdot \ln \left(\frac{1}{x3} + \frac{1}{x3} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot x3} - 1 \right)$$

$$\phi_{x3} = 0.993$$

$$q3 := \frac{1}{\tau_0} \cdot e^{\frac{-D \cdot \phi_{x3}}{2 \cdot K \cdot T3}}$$

$$q3 = 1.132 \times 10^{-13}$$

С учетом перенапряжений

$$x_{03j} := \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T3} \cdot \beta \cdot \eta E_j$$

$$\phi_{x_{03j}} := \sqrt{1 - 2 \cdot x_{03j}} - x_{03j} \cdot \ln \left(\frac{1}{x_{03j}} + \frac{1}{x_{03j}} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot x_{03j}} - 1 \right) \tau_{6j} := \frac{1}{\tau_0} \cdot e^{\frac{-D \cdot \phi_{x_{03j}}}{2 \cdot K \cdot T3}}$$

$x_{03j} =$	$\phi_{x_{03j}} =$	$\tau_{6j} =$	$q_{03j} =$
0.048	0.7746	5.6824·10 ⁻¹⁵	5.6747·10 ⁻⁸
0.045	0.7837	2.4658·10 ⁻¹⁴	3.2796·10 ⁻⁸
0.043	0.7929	8.3917·10 ⁻¹⁴	1.8795·10 ⁻⁸
0.041	0.8023	2.2354·10 ⁻¹³	1.0677·10 ⁻⁸
0.038	0.8119	4.6601·10 ⁻¹³	6.0087·10 ⁻⁹
0.036	0.8216	7.6043·10 ⁻¹³	3.3481·10 ⁻⁹
0.033	0.8315	9.7139·10 ⁻¹³	1.846·10 ⁻⁹
0.031	0.8416	9.7139·10 ⁻¹³	1.0063·10 ⁻⁹
0.028	0.8519	7.6043·10 ⁻¹³	5.4191·10 ⁻¹⁰
0.026	0.8624	4.6601·10 ⁻¹³	2.8798·10 ⁻¹⁰
0.023	0.8731	2.2354·10 ⁻¹³	1.5084·10 ⁻¹⁰
0.021	0.8841	8.3917·10 ⁻¹⁴	7.7758·10 ⁻¹¹
0.018	0.8954	2.4658·10 ⁻¹⁴	3.9376·10 ⁻¹¹
0.016	0.9071	5.6824·10 ⁻¹⁵	1.9542·10 ⁻¹¹

$$S3 := \sum_{j=1}^{14} (q_{03j} \cdot \tau_{6j})$$

$$S3 = 1.38 \times 10^{-20}$$

При рабочей напряженности поля при температуре

$$T4 := 321$$

$$x4 := \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T4} \cdot \beta \cdot (\eta \cdot E_{рабс})$$

$$x4 = 8.052 \times 10^{-4}$$

$$\phi_{x4} := \sqrt{1 - 2 \cdot x4} - x4 \cdot \ln \left(\frac{1}{x4} + \frac{1}{x4} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot x4} - 1 \right)$$

$$\phi_{x4} = 0.993$$

$$q4 := \frac{1}{\tau_0} \cdot e^{\frac{-D \cdot \phi_{x4}}{2 \cdot K \cdot T4}}$$

$$q4 = 4.615 \times 10^{-12}$$

С учетом перенапряжений

$$x_{04j} := \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T4} \cdot \beta \cdot \eta E_j$$

$$\phi_{x_{04j}} := \sqrt{1 - 2 \cdot x_{04j}} - x_{04j} \cdot \ln \left(\frac{1}{x_{04j}} + \frac{1}{x_{04j}} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot x_{04j}} - 1 \right) q_{04j} := \frac{1}{\tau_0} \cdot e^{\frac{-D \cdot \phi_{x_{04j}}}{2 \cdot K \cdot T4}}$$

$x_{04j} =$	$\phi_{x04j} =$	$\tau_{6j} =$	$q_{04j} =$
0.046	0.7815	$5.6824 \cdot 10^{-15}$	$6.9976 \cdot 10^{-7}$
0.044	0.7904	$2.4658 \cdot 10^{-14}$	$4.2461 \cdot 10^{-7}$
0.041	0.7994	$8.3917 \cdot 10^{-14}$	$2.5571 \cdot 10^{-7}$
0.039	0.8085	$2.2354 \cdot 10^{-13}$	$1.5278 \cdot 10^{-7}$
0.037	0.8178	$4.6601 \cdot 10^{-13}$	$9.0517 \cdot 10^{-8}$
0.034	0.8272	$7.6043 \cdot 10^{-13}$	$5.3151 \cdot 10^{-8}$
0.032	0.8368	$9.7139 \cdot 10^{-13}$	$3.0914 \cdot 10^{-8}$
0.029	0.8466	$9.7139 \cdot 10^{-13}$	$1.7798 \cdot 10^{-8}$
0.027	0.8566	$7.6043 \cdot 10^{-13}$	$1.0135 \cdot 10^{-8}$
0.025	0.8668	$4.6601 \cdot 10^{-13}$	$5.7028 \cdot 10^{-9}$
0.022	0.8772	$2.2354 \cdot 10^{-13}$	$3.1674 \cdot 10^{-9}$
0.02	0.8878	$8.3917 \cdot 10^{-14}$	$1.7341 \cdot 10^{-9}$
0.018	0.8988	$2.4658 \cdot 10^{-14}$	$9.3427 \cdot 10^{-10}$
0.015	0.9101	$5.6824 \cdot 10^{-15}$	$4.9432 \cdot 10^{-10}$

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

$$S_4 = 2.112 \times 10^{-19}$$

ORIGIN := 1 i := 1..4

4.13. Найдем время до отказа

$$q_0 := \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{pmatrix}$$

$$S := \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{pmatrix}$$

$$q_0 = \begin{pmatrix} 8.0662 \times 10^{-19} \\ 4.0804 \times 10^{-16} \\ 1.1321 \times 10^{-13} \\ 4.6151 \times 10^{-12} \end{pmatrix}$$

$$S = \begin{pmatrix} 2.5417 \times 10^{-24} \\ 2.2789 \times 10^{-22} \\ 1.3799 \times 10^{-20} \\ 2.1122 \times 10^{-19} \end{pmatrix}$$

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

$$\tau_{сл} = 2.7239 \times 10^{11} \text{ года}$$

5. Конструктивные расчеты

5.1. Расчет радиуса экрана для выравнивания электрического поля на фланце изолятора

5.1.1. Максимальная напряженность электрического поля у экрана зависит от номинального напряжения, радиуса экрана и высоты изолятора

$$U_H = 70 \quad l_d = 0.732$$

$$R_э := \begin{pmatrix} 0.02 \\ 0.08 \\ 0.18 \end{pmatrix}$$

$$H := l_d + R_э$$

$$H = \begin{pmatrix} 0.752 \\ 0.812 \\ 0.912 \end{pmatrix}$$

ORIGIN := 1

i := 1..3

$$E_{\max i} := \frac{U_H \cdot 1000}{R_{э i} \cdot \left(1 - \frac{R_{э i}}{2 \cdot H_i}\right)} \cdot \left[1 + 3 \cdot \left(\frac{R_{э i}}{2 \cdot H_i}\right)^2\right]$$

$$E_{\max i} =$$

$3.549 \cdot 10^6$
$9.271 \cdot 10^5$
$4.441 \cdot 10^5$

5.1.2. При заданном радиусе экрана критическая напряженность электрического поля, при которой развиваются коронные разряды найдем

$m := 0.8$ коэффициент гладкости поверхности экрана 0,6 - 0,8

$\delta := 1$ относительная плотность воздуха при нормальных условиях

$$E_{\text{крит}} := 1.65 \cdot m \cdot \delta \cdot 3 \cdot 10^6 \cdot \frac{0.13}{(\delta \cdot R_{э})^{0.38}}$$

$$E_{\text{крит}} = \begin{pmatrix} 2.276 \times 10^6 \\ 1.344 \times 10^6 \\ 9.877 \times 10^5 \end{pmatrix}$$

5.1.3. Радиус экрана найдем из условия равенства максимальной и критической напряженностей электрического поля. Воспользуемся графическим определением этого условия, что соответствует точке пересечения кривых изменения этих напряженностей от радиуса экрана.

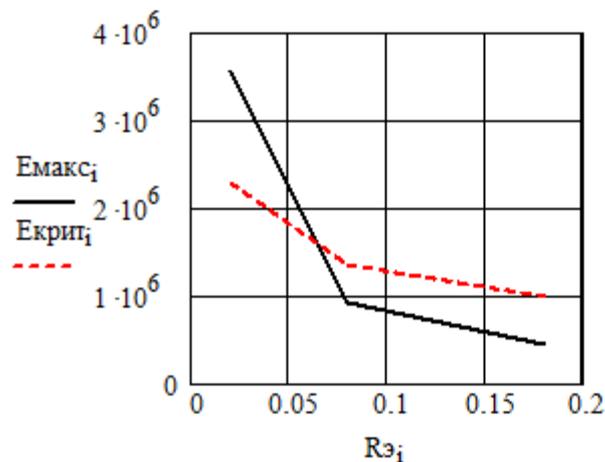


График зависимости E_{\max} и $E_{\text{крит}}$ от радиуса экрана.

Точка пересечения этих кривых соответствует радиусу экрана $R_{экр} = 0.08$ м.

$$R_{э} := 0.08$$

Приложение 2. Расчет импульсного конденсатора с бумажно-пленочной изоляцией на напряжение 70 кВ.

В расчете используется конденсаторная бумага и полиэтилентерефталатная пленка.

2. Электрический расчет

2.1. Расчет наружной изоляции

2.1.1. Исходя из технического задания (по заданному значению $U_{ном}$) по ГОСТ 1516.1-76 находим $U_{схр}$, $U_{мкр}$, $U_{имп}$.

$$U_{схр} := 150 \quad \text{кВ}$$

$$U_{дгост} := 120 \quad \text{кВ}$$

$$U_{и} := 260 \quad \text{кВ}$$

$$U_{н} = 70 \quad \text{кВ}$$

2.1.2. Выполняем расчет наружной изоляции, принимая за расчетное напряжение

$$U_0 := 1.1 \cdot U_{схр} \quad U_0 = 165 \quad \text{кВ}$$

2.1.3. Для определения l используем эмпирические формулы

$$l_B := \frac{1.1 \cdot U_{схр}}{295} \quad l_B = 0.559 \quad \text{м}$$

$$l_D := \frac{U_{схр}}{205} \quad l_D = 0.732 \quad \text{м}$$

$$l_{и} := \frac{U_{и}}{500} \quad l_{и} = 0.52 \quad \text{м}$$

Из трёх найденных значений выбираем наибольшее, т.е. $l_D = 0.732 \quad \text{м}$

2.1.4. Находим длину масляной части изолятора

$$l_M := \frac{U_0}{800} \quad l_M = 0.206 \quad \text{м}$$

2.1.5. Рассчитываем количество ребер и их размеры:

$n_p := 1.5 + 0.065 \cdot U_n$	$n_p = 6.05$	Принимаем	$n_p := 6$
$t_p := \frac{l_b}{n_p}$	$t_p = 0.093$	Принимаем	$t_p := 0.125 \text{ м}$
$a_p := 0.9 \cdot t_p$	$a_p = 0.113$	Принимаем	$a_p := 0.12 \text{ м}$
		Принимаем	$a_{p1} := 0.13 \text{ м}$

2.1.6. Производим проверку изолятора из условия перекрытия под дождем:

$$U_{др} := \left(124 \cdot l_b^{0.77} + 42 \cdot n_p \cdot t_p^{0.6} \cdot \frac{a_{p1}}{a_p} \right)$$

$$U_{др} = 157.671 \text{ кВ} \quad U_{дгост} = 120 \text{ кВ}$$

2.2. Электрический расчет внутренней изоляции

2.2.1. Из справочника находим электрическую прочность бумажно-масляной изоляции $E_{пр1} = 40 \text{ МВ/м}$ и электрическую прочность полиэтилентерфталатной пленки $E_{пр2} = 150 \text{ МВ/м}$. Для предварительных расчетов примем среднее значение электрической прочности $E_{пр} = 95 \text{ МВ/м}$.

$$E_{пр1} := 40 \cdot 10^6 \text{ В/м} \quad E_{пр2} := 150 \cdot 10^6 \text{ В/м} \quad E_{пр} := 95 \cdot 10^6 \text{ В/м}$$

2.2.2. Определим значение допустимой рабочей напряженности $E_{рабд}$, принимая значения коэффициента запаса k_1 от 1.1 до 1.6, коэффициента разброса электрической прочности k_2 от 1.2 до 2.2 и коэффициента изменения длительной электрической прочности k_3 от 1.3 до 2.5. Значения коэффициентов берут тем больше, чем больше частота переменного тока

$$k_1 := 1.1 \quad k_2 := 1.2 \quad k_3 := 1.3$$

$$E_{рабд} := \frac{E_{пр}}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3} \quad E_{рабд} = 5.536 \times 10^7 \text{ В/м}$$

2.2.3. Изоляцию между обкладками выполним из 2 слоев бумаги и 3 слоев полиэтилентерфталатной пленки толщиной 10 мкм.

$$n_1 := 2 \quad n_2 := 3 \quad \delta_1 := 10 \cdot 10^{-6} \text{ м} \quad \delta_2 := 20 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$d := (n_1 \cdot \delta_1 + n_2 \cdot \delta_2) \quad d = 8 \times 10^{-5} \text{ м}$$

$\epsilon_1 := 3.86$ - диэлектрическая проницаемость бумаги

$\epsilon_2 := 3.2$ - диэлектрическая проницаемость пленки

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

$$n_{пос} := \frac{U_n \cdot 1000}{E_{рабд} \cdot d} \quad n_{пос} = 15.805 \quad \text{Примем} \quad n_{пос} := 16$$

2.2.5. Определим рабочую напряженность электрического поля и значение напряжения, приходящихся на одну секцию.

$$U_c := \frac{U_n \cdot 1000}{8} \cdot \frac{0.78 \cdot \tau_1^2}{\tau_2^2} \quad U_c = 1.706 \times 10^3 \text{ - импульсное напряжение, приходящееся на одну секцию}$$

$$E_{\text{рабс}} := \frac{U_c}{n_{\text{пос}} \cdot (n_1 \cdot \delta_1 + n_2 \cdot \delta_2)} \quad E_{\text{рабс}} = 1.422 \times 10^6$$

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

$$E_1 := \frac{U_c}{n_1 \cdot \delta_1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot (n_2 \cdot \delta_2)} \quad E_1 = 1.847 \times 10^7 \text{ В/м} \quad E_{\text{пр1}} = 4 \times 10^7 \text{ В/м}$$

$$E_2 := \frac{U_c}{n_2 \cdot \delta_2 + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \cdot (n_1 \cdot \delta_1)} \quad E_2 = 2.228 \times 10^7 \text{ В/м} \quad E_{\text{пр2}} = 1.5 \times 10^8 \text{ В/м}$$

Из проведенных расчетов видно, что напряженности электрического поля E_1 конденсаторной бумаги и E_2 пленочной изоляции не превышают значения их электрической прочности соответственно $E_{\text{пр1}}$ и $E_{\text{пр2}}$.

2.2.7. Из проведенных расчетов видно, что напряженности электрического поля E_1 в бумажно-масляной и E_2 в пленочной изоляции не превышают значения их электрической прочности, т.к. запас большой примем количество последовательных секций меньше расчетного.

2.2.8. Найдем испытательное напряжение секции и длину закраины

$$U_{\text{испс}} := 2.2 \cdot U_c \quad U_{\text{испс}} = 3.754 \times 10^3 \text{ В}$$

$$k_{\text{зак}} := 1.5 \left(\frac{\text{мм}}{\text{кВ}} \right) \text{ - коэффициент закраины}$$

$$l_{\text{тех}} := 5 \text{ (мм)} \text{ - допуск на технологическое смещение фольги}$$

$$\Delta l := k_{\text{зак}} \cdot U_{\text{испс}} + l_{\text{тех}} \quad \Delta l = 5.636 \times 10^3 \text{ (мм)} \quad \text{Примем} \quad \Delta l := 9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

2.2.9. Найдем толщину изоляции между секциями и от корпуса

$$k_1 := 1.1 \quad k_2 := 1.2 \quad k_3 := 1.3 \quad k_{\text{п}} := 1.3$$

$$\Delta_{\text{изс}} := \frac{2U_{\text{испс}}}{E_{\text{рабс}}} \cdot k_1 \quad \Delta_{\text{изс}} = 5.808 \times 10^{-3} \text{ м} \quad \text{Примем} \quad \Delta_{\text{изс}} := 6.0 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

$$\Delta_{\text{изк}} := \frac{U_{\text{н}} \cdot 1000}{E_{\text{пр1}}} \cdot k_1 \cdot k_{\text{п}} \quad \Delta_{\text{изк}} = 2.503 \times 10^{-3} \text{ м} \quad \text{Примем} \quad \Delta_{\text{изк}} := 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

2.3. Расчет емкости секций

2.3.1. Выполним расчет диэлектрической проницаемости комбинированной бумажно-пленочной изоляция, определив из справочной литературы значения ε отдельных компонентов (бумаги, пропитывающей жидкости и пленки),

$$\varepsilon_{\text{к}} := 6.6 \quad \text{Диэлектрическая проницаемость клетчатки} \quad k := 1$$

$$\varepsilon_{\text{ж}} := 4.5 \quad \text{Диэлектрическая проницаемость пропитывающей жидкости (касторовое масло)} \quad \gamma_{\text{б}} := 1000 \text{ Плотность бумаги}$$

$$\varepsilon_{\text{п}} := 3.2 \quad \text{Диэлектрическая проницаемость полиэтилентерефталатной пленки} \quad \gamma_{\text{к}} := 1550 \text{ Плотность клетчатки}$$

$$\gamma_{\text{п}} := 1400 \text{ Плотность пленки}$$

$$x := 1 - \frac{\gamma_B}{\gamma_K} \quad x = 0.355$$

$$\varepsilon_{BM} := \frac{\varepsilon_{Ж}}{1 + \frac{\gamma_B \cdot k \cdot \left[\left(\frac{\varepsilon_{Ж}}{\varepsilon_K} \right) - 1 \right]}{\gamma_K}}$$

$$\varepsilon_{BM} = 5.662$$

диэлектрическая проницаемость
бумажно-масляной изоляции

$$\varepsilon_{BP} := \frac{\varepsilon_{BM}}{1 + \frac{\gamma_P \cdot k \cdot \left[\left(\frac{\varepsilon_{BM}}{\varepsilon_P} \right) - 1 \right]}{\gamma_K}}$$

$$\varepsilon_{BP} = 3.341$$

диэлектрическая проницаемость
бумажно-пленочной изоляции

2.3.2. Уточним значение диэлектрической проницаемости с учетом объемных долей компонентов

$$\theta_1 := \frac{n_1 \cdot \delta_1}{n_1 \cdot \delta_1 + n_2 \cdot \delta_2} \cdot (1 - x)$$

$$\theta_1 = 0.161$$

объемная доля, занимаемая
клетчаткой

$$\theta_3 := x \cdot \frac{n_1 \cdot \delta_1}{n_1 \cdot \delta_1 + n_2 \cdot \delta_2}$$

$$\theta_3 = 0.089$$

объемная доля, занимаемая
воздухом

$$\theta_2 := 1 - (\theta_1 + \theta_3)$$

$$\theta_2 = 0.75$$

объемная доля, занимаемая
пленкой

$$\varepsilon_{БМП} := \frac{1}{\frac{\theta_1}{\varepsilon_K} + \frac{\theta_3}{\varepsilon_{Ж}} + \frac{\theta_2}{\varepsilon_P}}$$

$$\varepsilon_{BP} = 3.341$$

$$\varepsilon_{БМП} = 3.59$$

диэлектрическая проницаемость
бумажно-пленочной изоляции

Примем $\varepsilon_{BP} := 3.3$

2.3.3. В соответствии с прототипом заданного конденсатора зададим размеры корпуса (высоту H, ширину B и длину L), зазор от крышки Δ, толщину стенок Δ_{МЕТ} и выберем вертикальную компоновку расположения секций со скрытой фольгой а) и горизонтальную компоновку с выступающей фольгой б)

$$H := 0.3 \text{ [м]}$$

$$B := 0.16 \text{ [м]}$$

$$L := 0.3 \text{ м}$$

$$\Delta_{\text{МЕТ}} := 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ [м]}$$

$$\Delta := 0.06 \text{ [м]}$$

$$\Delta_c := 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

а) для секций со скрытой фольгой

$$b_{\text{ССК}} := B - \Delta - 2\Delta_{\text{МЕТ}} - 2\Delta_{\text{ДИЗК}}$$

$$b_{\text{ССК}} = 0.093 \text{ м}$$

$$h_{\text{ССК}} := H - 2 \cdot \Delta_{\text{МЕТ}} - 2\Delta_{\text{ДИЗК}}$$

$$h_{\text{ССК}} = 0.293 \text{ м}$$

Примем: $b_{\text{ССК}} := 100 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ $h_{\text{ССК}} := 300 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

2.3.4. Рассчитаем емкость секции и, исходя из заданной емкости конденсатора, определим число параллельных секций.

$$k_3 := 0.9$$

$$\Delta\phi := 12 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$\varepsilon_0 := 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{М}}$$

Путем подбора значения Δc сравниваем величины $C_{с1}$ и $C_{с2}$

а) для секций со скрытой фольгой

$$\Delta_{сск} := 10.38 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$C_{сск1} := \frac{\epsilon_{бп} \cdot \epsilon_0 \cdot (b_{сск} - 2 \cdot \Delta l) \cdot \left(h_{сск} - \Delta c + \frac{\pi}{4} \cdot \Delta_{сск} \cdot k_3 \right) \cdot \Delta_{сск} \cdot k_3^2}{d \cdot (d + \Delta \phi)}$$

$$C_{сск1} = 8.134 \times 10^{-7} \quad \Phi$$

Число параллельных секций

$$C_{к} := 2.17 \cdot 10^{-6} \quad \Phi$$

$$n_{пар} := \frac{C_{к} \cdot n_{пос}}{C_{сск1}} \quad n_{пар} = 40.015 \quad \text{Примем } n_{пар} := 40$$

$$C_{сск2} := C_{к} \cdot \frac{n_{пос}}{n_{пар}} \quad C_{сск2} = 8.138 \times 10^{-7} \text{ (}\Phi\text{)} \quad \Delta_{сск} := 10.38 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

2.3.5. Скомпануем секции в пакет, рассчитываем его размеры и габариты конденсатора

а) для секций со скрытой фольгой

Размеры пакета

$$h_{пск} := h_{сск} + 2 \cdot \Delta_{изк} \quad h_{пск} = 0.306 \quad \text{м}$$

$$b_{пск} := b_{сск} + 2 \cdot \Delta_{изк} \quad b_{пск} = 0.106 \quad \text{м}$$

$$l_{пск} := n_{пар} \cdot n_{пос} \cdot \Delta_{сск} + n_{пар} \cdot n_{пос} \cdot \Delta_{изс} + 2 \cdot \Delta_{изк} \quad l_{пск} = 6.594 \quad \text{м}$$

Размеры корпуса

$$h_{кск} := b_{пск} + \Delta + 2 \cdot \Delta_{мет} \quad h_{кск} = 0.167 \quad \text{м}$$

$$b_{кск} := h_{пск} + 2 \cdot \Delta_{мет} \quad b_{кск} = 0.307 \quad \text{м}$$

$$l_{кск} := l_{пск} + 2 \cdot \Delta_{мет} \quad l_{кск} = 6.595 \quad \text{м}$$

3. Тепловой расчет конденсатора.

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

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

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

$$\epsilon_{к} := 6.6 \quad \text{Диэлектрическая проницаемость клетчатки} \quad k := 1$$

$$\epsilon_{ж} := 4.5 \quad \text{Диэлектрическая проницаемость пропитывающей жидкости} \quad \gamma_{б} := 1000 \quad \text{Плотность бумаги}$$

$$\epsilon_{п} := 3.2 \quad \text{Диэлектрическая проницаемость полипропиленовой пленки} \quad \gamma_{к} := 1550 \quad \text{Плотность клетчатки}$$

$$\gamma_{п} := 1400 \quad \text{Плотность пленки}$$

$$x := 1 - \frac{\gamma_{б}}{\gamma_{к}} \quad x = 0.355$$

$$\varepsilon_{бМ} = 5.662$$

диэлектрическая проницаемость
бумажно-пропитанной изоляции

$$\operatorname{tg}\delta_{бМ} = 0.026$$

тангенс угла диэлектрических потерь бумажно-
пропитанной изоляции

$$\varepsilon_{бП} := \frac{\varepsilon_{бМ}}{1 + \frac{\gamma_{п \cdot k} \cdot \left[\left(\frac{\varepsilon_{бМ}}{\varepsilon_{п}} \right) - 1 \right]}{\gamma_{к}}}$$

$$\varepsilon_{бП} = 3.341$$

диэлектрическая проницаемость
бумажно-пленочной изоляции

$$\operatorname{tg}\delta_{бП} := \frac{\operatorname{tg}\delta_{бМ}}{1 + \frac{\varepsilon_{бМ} \cdot \left(\frac{\gamma_{к} - k \cdot \gamma_{п}}{k \cdot \gamma_{п}} \right)}{\varepsilon_{п}}} + \frac{\operatorname{tg}\delta_{п}}{1 + \frac{\varepsilon_{п} \cdot \left(\frac{k \cdot \gamma_{п}}{\gamma_{к} - k \cdot \gamma_{п}} \right)}{\varepsilon_{бМ}}}$$

$$\operatorname{tg}\delta_{бП} = 0.022$$

тангенс угла диэлектрических потерь бумажно-
пленочной изоляции

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

$$a_{м} := \frac{\ln(\operatorname{tg}\delta_{бМ}) - \ln(\operatorname{tg}\delta_{бП})}{20 - 80} \quad m = 0.035$$

$$\operatorname{tg}\delta_{0м} := \frac{\operatorname{tg}\delta_{бМ}}{e^{a_{м} \cdot 80}} \quad \operatorname{tg}\delta_{0м} = 1.959 \times 10^{-4}$$

$$\operatorname{tg}\delta_{м1_n} := \operatorname{tg}\delta_{0м} \cdot e^{a_{м} \cdot T_{1_n}} \quad \operatorname{tg}\delta_{м} = 3.214 \times 10^{-3}$$

$$a_{п} := \frac{\ln(\operatorname{tg}\delta_{бП}) - \ln(\operatorname{tg}\delta_{бМ})}{20 - 80} \quad a_{п} = 0.035$$

$$\operatorname{tg}\delta_{0п} := \frac{\operatorname{tg}\delta_{бП}}{e^{a_{п} \cdot 80}} \quad \operatorname{tg}\delta_{0п} = 1.707 \times 10^{-4}$$

$$\operatorname{tg}\delta_{п1_n} := \operatorname{tg}\delta_{0п} \cdot e^{a_{п} \cdot T_{1_n}} \quad \operatorname{tg}\delta_{п} = 2.75 \times 10^{-3}$$

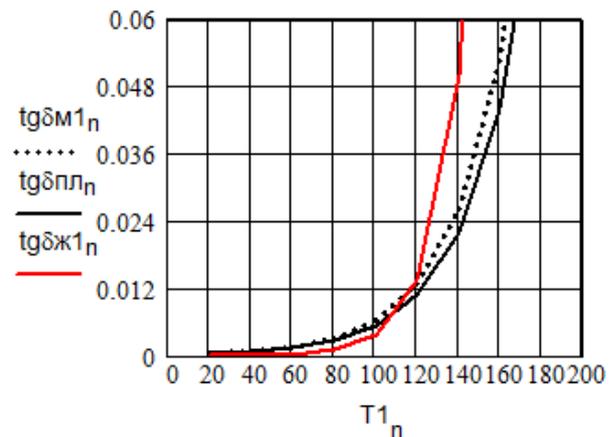
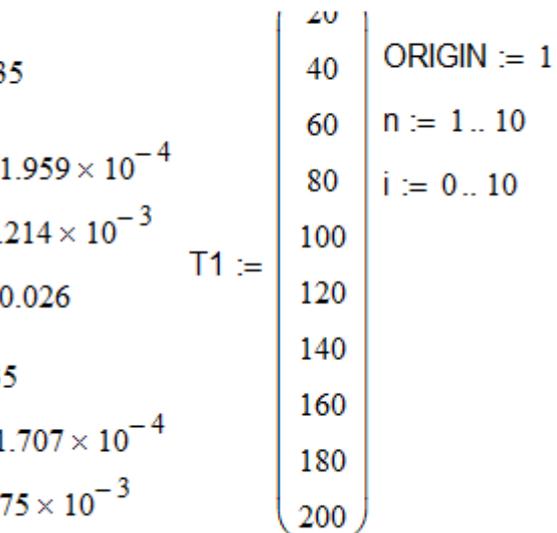
$$\operatorname{tg}\delta_{бП} = 0.022$$

$$a_{ж} := \frac{\ln(\operatorname{tg}\delta_{ж}) - \ln(\operatorname{tg}\delta_{ж1_n})}{20 - 80} \quad a_{ж} = 0.065$$

$$\operatorname{tg}\delta_{0ж} := \frac{\operatorname{tg}\delta_{ж}}{e^{a_{ж} \cdot 80}} \quad \operatorname{tg}\delta_{0ж} = 5.429 \times 10^{-6} \quad \operatorname{tg}\delta_{ж1_n} := \operatorname{tg}\delta_{0ж} \cdot e^{a_{ж} \cdot T_{1_n}}$$

$$T_{1_n} = \operatorname{tg}\delta_{м1_n} = \operatorname{tg}\delta_{п1_n} = \operatorname{tg}\delta_{ж1_n} =$$

20	$3.943 \cdot 10^{-4}$	$3.42 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$
40	$7.935 \cdot 10^{-4}$	$6.852 \cdot 10^{-4}$	$7.368 \cdot 10^{-5}$
60	$1.597 \cdot 10^{-3}$	$1.373 \cdot 10^{-3}$	$2.714 \cdot 10^{-4}$
80	$3.214 \cdot 10^{-3}$	$2.75 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
100	$6.468 \cdot 10^{-3}$	$5.508 \cdot 10^{-3}$	$3.684 \cdot 10^{-3}$
120	0.013	0.011	0.014
140	0.026	0.022	0.05
160	0.053	0.044	0.184
180	0.106	0.089	0.679
200	0.214	0.178	2.5



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

$$\text{tgoб} := \varepsilon_{\text{бмп}} \cdot \left(\frac{\theta_1 \cdot \text{tg}\kappa}{\varepsilon_{\text{к}}} + \frac{\theta_3 \cdot \text{tg}\text{ж}}{\varepsilon_{\text{ж}}} + \frac{\theta_2 \cdot \text{tg}\pi}{\varepsilon_{\text{п}}} \right) \quad \text{tgoб} = 7.619 \times 10^{-4} \quad \varepsilon_{\text{бмп}} = 3.59$$

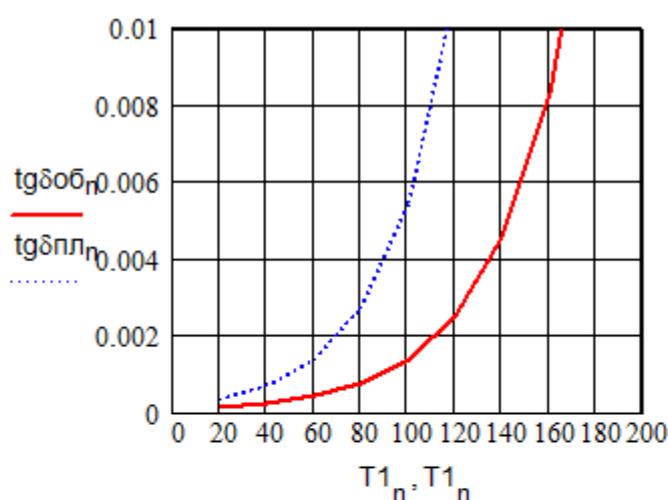
$$\text{tg}\delta_{\text{ооб}} := \varepsilon_{\text{бмп}} \cdot \left(\frac{\theta_1 \cdot \text{tg}\delta_{\text{к}}}{\varepsilon_{\text{к}}} + \frac{\theta_3 \cdot \text{tg}\delta_{\text{ж}}}{\varepsilon_{\text{ж}}} + \frac{\theta_2 \cdot \text{tg}\delta_{\text{п}}}{\varepsilon_{\text{п}}} \right) \quad \text{tg}\delta_{\text{ооб}} = 4.574 \times 10^{-3}$$

$$\text{aооб} := \frac{\ln(\text{tgoб}) - \ln(\text{tg}\delta_{\text{ооб}})}{20 - 80} \quad \text{aооб} = 0.03$$

$$\text{tg}\delta_{\text{0ооб}} := \frac{\text{tgoб}}{\Delta_{\text{aооб}} \cdot 80} \quad \text{tg}\delta_{\text{0ооб}} = 6.984 \times 10^{-5}$$

$$\text{tg}\delta_{\text{обn}} := \text{tg}\delta_{\text{0ооб}} \cdot e^{\text{aооб} \cdot T_{1n}}$$

$T_{1n} =$	$\text{tg}\delta_{\text{обn}} =$
20	$1.269 \cdot 10^{-4}$
40	$2.307 \cdot 10^{-4}$
60	$4.192 \cdot 10^{-4}$
80	$7.619 \cdot 10^{-4}$
100	$1.385 \cdot 10^{-3}$
120	$2.517 \cdot 10^{-3}$
140	$4.574 \cdot 10^{-3}$
160	$8.312 \cdot 10^{-3}$
180	0.015
200	0.027



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 $\text{tg}\delta$ за счет потерь на поляризацию.

3.2. Тепловой расчет проведем для сравнения по двум вариантам (со скрытой и выступающей фольгой). Для проведения теплового расчета зададим 4 значения температуры в центральной точке секции (рис. 2.1)

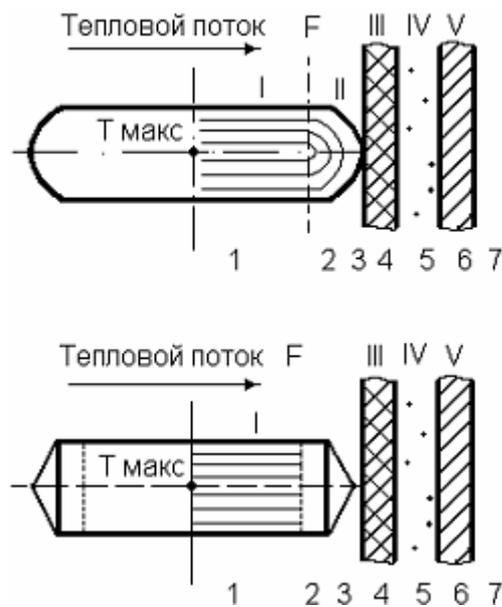


Рисунок 2.1 - Расположение элементов конденсатора относительно теплового потока F:

а) для секций со скрытой фольгой;

б) для секций с выступающей фольгой

I – участок параллельного расположения слоев;

II – участок перпендикулярного расположения слоев;

III – изоляция от корпуса;

IV – масляный промежуток;

V – стенка корпуса

$$T1 := \begin{pmatrix} 20 \\ 40 \\ 60 \\ 80 \end{pmatrix} \quad \text{tg}\delta_{пл} := \text{tg}\delta_{0п} \cdot e^{\text{ап} \cdot T1} \quad Cc := Cc_{ск1} \quad \text{ORIGIN} := 1$$

$$i := 1..4$$

3.2.1. Находим диэлектрические потери

а) для секций со скрытой фольгой

$$\omega := \frac{2\pi}{\tau 1}$$

$$P_{дск} := \frac{Uc^2 \cdot \omega \cdot Cc_{ск1} \cdot \text{tg}\delta_{пл}}{8} \cdot \frac{0.78 \cdot \tau 1^2}{\tau 2^2} \quad P_{дск} = \begin{pmatrix} 0.025 \\ 0.05 \\ 0.1 \\ 0.199 \end{pmatrix} \text{ Вт}$$

3.2.2. Находим потери в обкладках, принимая:

$$T0 := 20C \quad \text{b}_{выст} := 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\rho 0 := 28 \cdot 10^{-9} \text{ Ом м} \quad \alpha_{рф} := 0.00451/\text{град}$$

$$k3 := 0.9$$

а) для секций со скрытой фольгой

Активная длина обкладки

$$L_{аск} := \frac{\Delta c_{ск} \cdot k3}{2 \cdot (d + \Delta \phi)} \cdot \left(h_{сск} - \Delta c_{ск} + \frac{3.14}{4} \cdot \Delta c_{ск} \cdot k3 \right) \quad L_{аск} = 15.077 \text{ м}$$

3.2.3. Находим потери в обкладках

а) для секций со скрытой фольгой

$$n_{ск} := 1$$

$$P_{фск} := \frac{1}{6} \cdot \left(\frac{Uc \cdot \omega \cdot Cc_{ск1}}{n_{ск}} \right)^2 \cdot \frac{L_{аск}}{(b_{сск} - 2 \cdot \Delta l) \cdot \Delta \phi} \cdot \rho 0 \cdot [1 + \alpha_{рф} \cdot (T1 - T0)]$$

$$R_{\text{фск}} = \begin{pmatrix} 0.238 \\ 0.259 \\ 0.281 \\ 0.302 \end{pmatrix}$$

3.2.4. Тепловыделение в секции

а) со скрытой фольгой

$$R_{\text{сск}} = \begin{pmatrix} 0.263 \\ 0.309 \\ 0.38 \\ 0.501 \end{pmatrix}$$

$$R_{\text{сск}} := R_{\text{дск}} + R_{\text{фск}}$$

3.2.5. Удельные тепловыделения в секции

а) со скрытой фольгой

$$q_{\text{сск}} := \frac{R_{\text{сск}}}{(b_{\text{сск}} - 2 \cdot \Delta l) \cdot h_{\text{сск}} \cdot \Delta c_{\text{сск}}}$$

$$q_{\text{сск}} = \begin{pmatrix} 1.028 \times 10^3 \\ 1.21 \times 10^3 \\ 1.489 \times 10^3 \\ 1.964 \times 10^3 \end{pmatrix} \text{ Вт/м}^3$$

3.3. Расчет температуроперепадов на отдельных участках

Примем следующие характеристики:

$\lambda_k := 0.18$ теплопроводность клетчатки

$\lambda_{\text{бм}} := 0.21$ теплопроводность пропитанной бумаги

$\lambda_{\text{п}} := 0.19$ теплопроводность пленки

$\lambda_{\text{ф}} := 200$ теплопроводность фольги

$\lambda_{\text{ж}} := 0.24$ теплопроводность пропитывающей жидкости

$$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$$

3.3.1. Найдем эквивалентную теплопроводность на 1-ом участке когда слои последовательны

$$\lambda_{\text{экв1}} := \frac{\lambda_{\text{бм}} \cdot n1 \cdot \delta1 + \lambda_{\text{ф}} \cdot \Delta\phi + \lambda_{\text{п}} \cdot n2 \cdot \delta2}{n1 \cdot \delta1 + n2 \cdot \delta2 + \Delta\phi}$$

$$\lambda_{\text{экв1}} = 26.257 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$$

3.3.2. Перепад температуры на I участке секции

а) со скрытой фольгой

$$\Delta T_{1\text{ск}} := q_{\text{сск}} \cdot \frac{(h_{\text{сск}} - \Delta c_{\text{сск}})^2}{8 \cdot \lambda_{\text{экв1}}}$$

$$\Delta T_{1\text{ск}} = \begin{pmatrix} 0.411 \\ 0.483 \\ 0.595 \\ 0.784 \end{pmatrix} \text{ град}$$

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

а) в секции со скрытой фольгой тепловой поток пересекает слои перпендикулярно

$$\lambda_{\text{экв2ск}} := \frac{n1 \cdot \delta1 + n2 \cdot \delta2 + \Delta\phi}{\frac{n1 \cdot \delta1}{\lambda_{\text{бм}}} + \frac{(n2 \cdot \delta2)}{\lambda_{\text{п}}} + \frac{\Delta\phi}{\lambda_{\text{ф}}}}$$

$$\lambda_{\text{экв2ск}} = 0.224 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$$

3.3.4. Перепад температуры на II участке

а) для секций со скрытой фольгой

$$\Delta T_{2ск} := q_{сск} \cdot \frac{\Delta_{сск}^2}{8 \cdot \lambda_{экв2ск}} \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot (h_{сск} - \Delta_{сск})}{\Delta_{сск}} \right] \quad \Delta T_{2ск} = \begin{pmatrix} 3.516 \\ 4.136 \\ 5.09 \\ 6.713 \end{pmatrix} \text{ град}$$

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

$$\lambda_{экв3в} := \lambda_{ж} + \frac{(\lambda_{ф} - \lambda_{ж}) \cdot \Delta\phi \cdot k_3}{n_1 \cdot \delta_1 + n_2 \cdot \delta_2 + \Delta\phi} \quad \lambda_{экв3в} = 23.6 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$$

$$\Delta_{сп} := 3 \cdot 10^{-3}$$

3.3.6. Температура на поверхности секции

а) со скрытой фольгой

$$T_{иск} := T_1 - \Delta T_{1ск} - \Delta T_{2ск} \quad T_{иск} = \begin{pmatrix} 16.074 \\ 35.381 \\ 54.316 \\ 72.502 \end{pmatrix} \text{ град}$$

3.3.7. Тепловыделение в изоляции от корпуса

а) для секций со скрытой фольгой

$$q_{4ск} := \left(\frac{U_{н-1000} \cdot \varepsilon_{ж}}{\varepsilon_{ж} \cdot \Delta_{изк} + \varepsilon_{бм} \cdot \Delta_{ж}} \right)^2 \cdot \omega \cdot \varepsilon_{бм} \cdot \varepsilon_0 \cdot \Delta_{изк} \cdot \text{tg} \delta_{жск} \quad \Delta_{ж} := 1 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{tg} \delta_{жск} := \text{tg} \delta_0 \cdot e^{\alpha_{ж} \cdot T_{иск}}$$

$$q_{4ск} = \begin{pmatrix} 0.79 \\ 2.783 \\ 9.566 \\ 31.311 \end{pmatrix}$$

3.3.8. Найдем эквивалентная теплопроводность в изоляции от корпуса

$$\lambda_{эквкор} := \frac{\Delta_{изк} + \Delta\phi}{\frac{\Delta_{изк}}{\lambda_{бм}} + \frac{\Delta\phi}{\lambda_{ф}}} \quad \lambda_{эквкор} = 0.211 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$$

3.3.9. Перепад температуры в изоляции от корпуса

а) для секций со скрытой фольгой

$$\Delta T_{4ск} := \left(q_{сск} \cdot \frac{h_{сск}}{2} + \frac{q_{4ск}}{2} \right) \cdot \frac{\Delta_{изк}}{\lambda_{эквкор}} \quad \Delta T_{4ск} = \begin{pmatrix} 2.201 \\ 2.602 \\ 3.246 \\ 4.414 \end{pmatrix} \text{ град}$$

3.3.10. Температура на поверхности изоляции от корпуса

а) со скрытой фольгой

$$T_{\text{иск}} := T_1 - \Delta T_{1\text{ск}} - \Delta T_{2\text{ск}} - \Delta T_{4\text{ск}}$$

$$T_{\text{иск}} = \begin{pmatrix} 13.873 \\ 32.779 \\ 51.07 \\ 68.088 \end{pmatrix} \text{ град}$$

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

а) для секций со скрытой фольгой

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

$$q_{5\text{ск}} := \left(\frac{U_{\text{н}} \cdot 1000 \cdot \varepsilon_{\text{бм}}}{\varepsilon_{\text{ж}} \cdot \Delta_{\text{изк}} + \varepsilon_{\text{бм}} \cdot \Delta_{\text{ж}}} \right)^2 \cdot \omega \cdot \varepsilon_{\text{ж}} \cdot \varepsilon_0 \cdot \Delta_{\text{ж}} \cdot \text{tg}\delta_{\text{жск}} \quad q_{5\text{ск}} = \begin{pmatrix} 0.287 \\ 0.985 \\ 3.247 \\ 9.848 \end{pmatrix} \text{ Вт/м}^3$$

3.3.12. Перепад температуры в масляной прослойке с учетом конвекции

$$\varepsilon_{\text{конв}} := 1 \quad \lambda_{\text{экв5}} := \lambda_{\text{ж}} \cdot \varepsilon_{\text{конв}} \quad \lambda_{\text{экв5}} = 0.24$$

а) для секций со скрытой фольгой

$$\Delta T_{5\text{ск}} := \left(q_{\text{сск}} \cdot \frac{h_{\text{сск}}}{2} + q_{4\text{ск}} + \frac{q_{5\text{ск}}}{2} \right) \cdot \frac{\Delta_{\text{ж}}}{\lambda_{\text{экв5}}} \quad \Delta T_{5\text{ск}} = \begin{pmatrix} 0.647 \\ 0.77 \\ 0.977 \\ 1.378 \end{pmatrix} \text{ град}$$

3.3.13. Тепловыделение в конденсаторе найдем пренебрегая потерями в соединительных проводах.

а) для секций со скрытой фольгой

$$S_{\text{ск}} := 2 \cdot h_{\text{ск}} \cdot (B_{\text{ск}} + L_{\text{ск}})$$

$$S_{\text{ск}} = 2.305 \text{ м}^2$$

$$Q_{\text{ск}} := P_{\text{сск}} \cdot \eta_{\text{пос}} \cdot \eta_{\text{пар}} + q_{4\text{ск}} \cdot S_{\text{ск}} + q_{5\text{ск}} \cdot S_{\text{ск}}$$

$$Q_{\text{ск}} = \begin{pmatrix} 160.057 \\ 194.036 \\ 257.645 \\ 395.764 \end{pmatrix}$$

3.3.14. Перепад температуры в стенке корпуса

$$\lambda_{\text{ст}} := 5 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}} \quad \Delta_{\text{мет}} = 5 \times 10^{-4}$$

а) для секций со скрытой фольгой

$$\Delta T_{6\text{ск}} := \frac{Q_{\text{ск}} \cdot \Delta_{\text{мет}}}{S_{\text{ск}} \cdot \lambda_{\text{ст}}}$$

$$\Delta T_{6\text{ск}} = \begin{pmatrix} 6.429 \times 10^{-4} \\ 7.794 \times 10^{-4} \\ 1.035 \times 10^{-3} \\ 1.59 \times 10^{-3} \end{pmatrix} \text{ град}$$

3.3.15. Температура на поверхности корпуса

а) для секций со скрытой фольгой

$$T_{\text{кск}} := T_1 - \Delta T_{1\text{ск}} - \Delta T_{2\text{ск}} - \Delta T_{4\text{ск}} - \Delta T_{5\text{ск}} - \Delta T_{6\text{ск}} \quad T_{\text{кск}} = \begin{pmatrix} 13.225 \\ 32.009 \\ 50.092 \\ 66.708 \end{pmatrix} \text{ град}$$

3.4. Найдем температуроперепад в воздухе используя критерии теплового подобия

3.4.1. Зададим перепад температуры в воздухе $\Delta t_{\text{зад1}} := 5$ $\Delta t_{\text{зад2}} := 10$ град

а) для секций со скрытой фольгой

$$\begin{aligned} T_{i1\text{ск}} &:= T_{\text{кск}} - \Delta t_{\text{зад1}} \\ T_{i2\text{ск}} &:= T_{\text{кск}} - \Delta t_{\text{зад2}} \end{aligned} \quad T_{i1\text{ск}} = \begin{pmatrix} 8.225 \\ 27.009 \\ 45.092 \\ 61.708 \end{pmatrix} \quad T_{i2\text{ск}} = \begin{pmatrix} 3.225 \\ 22.009 \\ 40.092 \\ 56.708 \end{pmatrix} \text{ град}$$

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

а) для секций со скрытой фольгой

$$\begin{aligned} \lambda_{1\text{ск}} &:= (2.44 + 0.0077 \cdot T_{i1\text{ск}}) \cdot 0.01 \\ \lambda_{2\text{ск}} &:= (2.44 + 0.0077 \cdot T_{i2\text{ск}}) \cdot 0.01 \end{aligned} \quad \lambda_{1\text{ск}} = \begin{pmatrix} 0.025 \\ 0.026 \\ 0.028 \\ 0.029 \end{pmatrix} \quad \lambda_{2\text{ск}} = \begin{pmatrix} 0.025 \\ 0.026 \\ 0.027 \\ 0.029 \end{pmatrix}$$

а) для секций со скрытой фольгой

$$\begin{aligned} \nu_{1\text{ск}} &:= (13.28 + 0.0984 \cdot T_{i1\text{ск}}) \cdot 0.0 \\ \nu_{2\text{ск}} &:= (13.28 + 0.0984 \cdot T_{i2\text{ск}}) \cdot 0.0 \end{aligned} \quad \nu_{1\text{ск}} = \begin{pmatrix} 1.409 \times 10^{-5} \\ 1.594 \times 10^{-5} \\ 1.772 \times 10^{-5} \\ 1.935 \times 10^{-5} \end{pmatrix} \quad \nu_{2\text{ск}} = \begin{pmatrix} 1.36 \times 10^{-5} \\ 1.545 \times 10^{-5} \\ 1.723 \times 10^{-5} \\ 1.886 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

а) для секций со скрытой фольгой

$$\begin{aligned} Pr_{1\text{ск}} &:= 0.707 - 0.0000525 \cdot T_{i1\text{ск}} \\ Pr_{2\text{ск}} &:= 0.707 - 0.0000525 \cdot T_{i2\text{ск}} \end{aligned} \quad Pr_{1\text{ск}} = \begin{pmatrix} 0.707 \\ 0.706 \\ 0.705 \\ 0.704 \end{pmatrix} \quad Pr_{2\text{ск}} = \begin{pmatrix} 0.707 \\ 0.706 \\ 0.705 \\ 0.704 \end{pmatrix}$$

Примем: $g := 9.8$ $\beta := \frac{1}{273}$

$Pr_c := 0.7$ $L_{\text{ск}} := H_{\text{ск}}$

а) для секций со скрытой фольгой

$$\begin{aligned} Gr_{1\text{ск}} &:= g \cdot \beta \cdot \frac{L_{\text{ск}}^3}{\nu_{1\text{ск}}^2} \cdot \Delta t_{\text{зад1}} \\ Gr_{2\text{ск}} &:= g \cdot \beta \cdot \frac{L_{\text{ск}}^3}{\nu_{2\text{ск}}^2} \cdot \Delta t_{\text{зад2}} \end{aligned}$$

$$Gr_{1ск} = \begin{pmatrix} 4.211 \times 10^6 \\ 3.291 \times 10^6 \\ 2.663 \times 10^6 \\ 2.232 \times 10^6 \end{pmatrix} \quad Gr_{2ск} = \begin{pmatrix} 9.043 \times 10^6 \\ 7.008 \times 10^6 \\ 5.635 \times 10^6 \\ 4.7 \times 10^6 \end{pmatrix}$$

3.4.3. Для определения критерия Нусельта 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 $Gr \cdot Pr > 10^9$ $C=0.15$ $n=0,33$

а) для секций со скрытой фольгой

$$Gr_{1скj} \cdot Pr_{1скj} =$$

2.975·10 ⁸
2.322·10 ⁸
1.877·10 ⁸
1.571·10 ⁸

$$Gr_{2скj} \cdot Pr_{2скj} =$$

6.392·10 ⁸
4.947·10 ⁸
3.972·10 ⁸
3.309·10 ⁸

а) для секций со скрытой фольгой

$$Nu_{1скj} := 0.76 \cdot (Gr_{1скj} \cdot Pr_{1скj})^{0.25} \cdot \left(\frac{Pr_{1скj}}{Pr_c} \right)^{0.25}$$

$$Nu_{2скj} := 0.76 \cdot (Gr_{2скj} \cdot Pr_{2скj})^{0.25} \cdot \left(\frac{Pr_{2скj}}{Pr_c} \right)^{0.25}$$

$$Nu_{1скj} =$$

31.638
29.727
28.175
26.942

$$Nu_{2скj} =$$

38.306
35.916
33.988
32.461

3.4.4. Найдем коэффициент теплоотдачи

а) для секций со скрытой фольгой

$$\alpha_{к1скj} := \frac{Nu_{1скj} \cdot \lambda_{1скj}}{L_{ск}}$$

$$\alpha_{к2скj} := \frac{Nu_{2скj} \cdot \lambda_{2скj}}{L_{ск}}$$

$$\alpha_{к1скj} =$$

4.743
4.713
4.702
4.703

$$\alpha_{к2скj} =$$

5.654
5.612
5.594
5.592

3.4.5. Определим значения температуроперепада в воздухе при заданных значениях $\Delta t_{зад}$, принимая, что теплоотвод осуществляется только через боковую поверхность конденсатора.

а) для секций со скрытой фольгой

$$S_{бокск} := 2 \cdot H_{ск} \cdot (B_{ск} + L_{ск}) + B_{ск} \cdot L_{ск} \quad S_{бокск} = 4.33$$

$$\Delta t_{пол1скj} := \frac{Q_{скj}}{\alpha_{к1скj} \cdot S_{бокск}}$$

$$\Delta t_{пол2скj} := \frac{Q_{скj}}{\alpha_{к2скj} \cdot S_{бокск}}$$

$$\Delta t_{пол1скj} =$$

7.794
9.507
12.654
19.435

$$\Delta t_{пол2скj} =$$

6.538
7.985
10.637
16.346

град

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

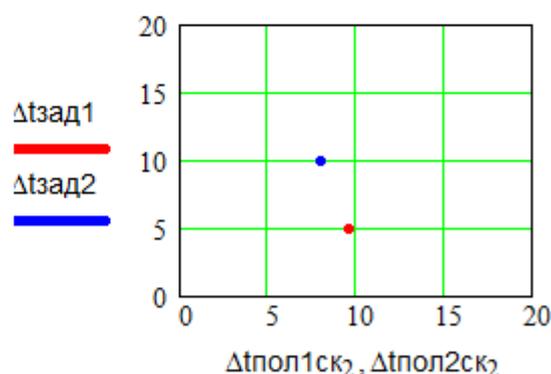
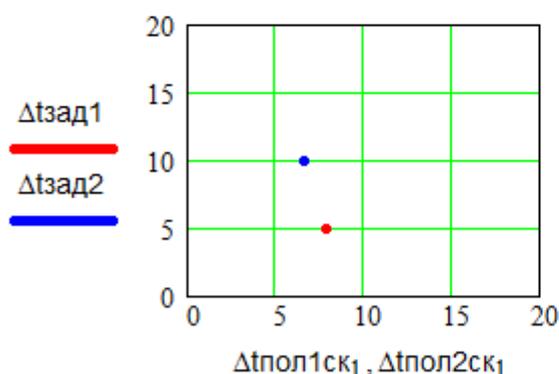
а) для секций со скрытой фольгой

$$\Delta 1_{скj} := \frac{\Delta t_{пол1скj} - \Delta t_{пол2скj}}{\Delta t_{зад1} - \Delta t_{зад2}}$$

$$\Delta 2_{скj} := \Delta t_{пол1скj} - \Delta t_{зад1} \cdot \Delta 1_{скj}$$

$$\Delta t_{возскj} := \frac{\Delta 2_{скj}}{1 - \Delta 1_{скj}}$$

$$\Delta t_{возск} = \begin{pmatrix} 7.233 \\ 8.455 \\ 10.454 \\ 13.923 \end{pmatrix} \text{ град}$$

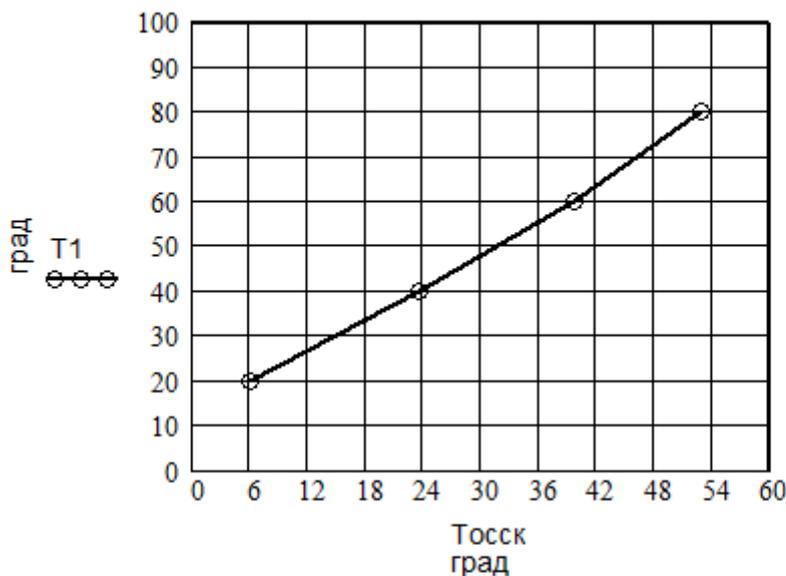


3.4.7. Построим график тепловой устойчивости

а) для секций со скрытой фольгой

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

$$T_1 = \begin{pmatrix} 20 \\ 40 \\ 60 \\ 80 \end{pmatrix}$$



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

$$T_{\text{макс}} := 60^{\circ}\text{C} \quad \text{при} \quad T = 40^{\circ}\text{C}$$

$T_{\text{доп}} := 130^{\circ}\text{C}$ для полиэтилентерфталатной пленки

$T_{\text{доп}} := 150^{\circ}\text{C}$ для касторового масла

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

Вывод: Так как $T_{\text{макс}}$ менее $T_{\text{доп}}$, то условие тепловой устойчивости выполняется

4. Расчет срока службы.

4.1. Для проведения расчета примем следующие параметры изоляции:

- $D := 5 \cdot 10^{-19}$ - энергия диссоциации химической связи:
- $A := 9.8 \cdot 10^{-29}$ - постоянный коэффициент, характеризующий материал диэлектрика
- $b := 0.002$ - температурны коэффициент
- $\nu_0 := 2 \cdot 10^{-7}$ - элементарный объем, содержащий хотя бы одну неоднородность
- $K := 1.38 \cdot 10^{-23}$ - постоянная Больцмана
- $\tau_0 := 1 \cdot 10^{-13}$ - время релаксации:
- $\nu := 6$ - коэффициент неоднородности
- $p := 0.1$ - концентрация неоднородностей
- $k := \text{ппос-ппар}$ - количество секций
- $P_{\tau} := 0.9$ - заданная вероятность безотказной работы конденсатора
- $U_{\text{и}} := 80000$ - амплитуда перенапряжений
- $\sigma_{\text{и}} := 5000$ - среднеквадратичное отклонение
- $N := 10000$ - количество импульсов перенапряжений
- $t_{\text{и}} := 20 \cdot 10^{-6}$ - длительность импульса перенапряжений
- $t_{\text{г}} := 31.536 \cdot 10^6$ - продолжительность года

4.2. Найдем вероятность безотказной работы одной секции при заданной вероятности безотказной работы P_t :

$$P_n := P_t^{\frac{1}{k}} \quad P_n = 1$$

4.3. Методом подбора найдем коэффициент (y), принимая что $F(y) = P_n$.

Коэффициент неоднородности поля η примем равным 1.

$$v := (b_{\text{ССК}} - 2 \cdot \Delta l) \cdot b_{\text{ССК}} \cdot \Delta c_{\text{В}} \quad v = 9.02 \times 10^{-5} \quad \eta := 1$$

$$F_y := \left(1 - e^{1.67 \cdot y \cdot \ln(1.3 \cdot p)}\right)^{\frac{v}{v_0 \cdot \eta \cdot y}} \quad F_y = 0.998 \quad y := 3.3$$

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

$$\beta := \frac{v}{1 + (v - 1) \cdot \frac{1}{y^2 - 1} \cdot \left(\frac{y}{\sqrt{y^2 - 1}} \cdot \ln(y + \sqrt{y^2 - 1})\right)} \quad \beta = 3.017$$

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

$$t_i := \begin{pmatrix} 5 \cdot 10^6 \\ 19.5 \cdot 10^6 \\ 11 \cdot 10^6 \\ 6 \cdot 10^6 \end{pmatrix} \quad T_{\text{ос}} := \begin{pmatrix} 253 \\ 273 \\ 293 \\ 313 \end{pmatrix}$$

4.6. При данных температурах найдем температуры изоляции из графика тепловой устойчивости

$$T_{\text{из}} := \begin{pmatrix} 263 \\ 286 \\ 311 \\ 334 \end{pmatrix}$$

4.7. Перенапряжения, являющиеся случайными величинами, заменим переменными

$$U_{\text{max}} := U_{\text{и}} + 4 \cdot \sigma_{\text{и}} \quad U_{\text{max}} = 1 \times 10^5 \quad \text{В}$$

$$U_{\text{min}} := U_{\text{и}} - 4 \cdot \sigma_{\text{и}} \quad U_{\text{min}} = 6 \times 10^4 \quad \text{В}$$

4.8 Число интервалов

$$N := \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{\sigma_{\text{и}}} \quad N = 8$$

4.9. Ширина интервала

$$\Delta U := \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{N} \quad \Delta U = 5 \times 10^3 \quad \text{В}$$

4.10. Примем, что распределение значений перенапряжения U_j подчиняется нормальному закону

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

$j =$	$J_j =$	$U_{j-1} =$	$U_{\text{ср}j} =$	$\frac{U_j - U_{\text{И}}}{2\sigma_{\text{И}}} =$	$\frac{U_{j-1} - U_{\text{И}}}{2\sigma_{\text{И}}} =$	$FU :=$
1	$9.5 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$	$9.75 \cdot 10^4$	1.5	2	0.00023
2	$9 \cdot 10^4$	$9.5 \cdot 10^4$	$9.25 \cdot 10^4$	1	1.5	0.00135
3	$8.5 \cdot 10^4$	$9 \cdot 10^4$	$8.75 \cdot 10^4$	0.5	1	0.00621
4	$8 \cdot 10^4$	$8.5 \cdot 10^4$	$8.25 \cdot 10^4$	0	0.5	0.02275
5	$7.5 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^4$	$7.75 \cdot 10^4$	-0.5	0	0.06681
6	$7 \cdot 10^4$	$7.5 \cdot 10^4$	$7.25 \cdot 10^4$	-1	-0.5	0.15866
7	$6.5 \cdot 10^4$	$7 \cdot 10^4$	$6.75 \cdot 10^4$	-1.5	-1	0.30854
8	$6 \cdot 10^4$	$6.5 \cdot 10^4$	$6.25 \cdot 10^4$	-2	-1.5	0.50000
9	$5.5 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$	$5.75 \cdot 10^4$	-2.5	-2	0.69146
10	$5 \cdot 10^4$	$5.5 \cdot 10^4$	$5.25 \cdot 10^4$	-3	-2.5	0.84134
11	$4.5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	$4.75 \cdot 10^4$	-3.5	-3	0.93319
12	$4 \cdot 10^4$	$4.5 \cdot 10^4$	$4.25 \cdot 10^4$	-4	-3.5	0.97725
13	$3.5 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	$3.75 \cdot 10^4$	-4.5	-4	0.99379
14	$3 \cdot 10^4$	$3.5 \cdot 10^4$	$3.25 \cdot 10^4$	-5	-4.5	0.99865
						0.99977

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

$$\Delta F_j := FU_j - FU_{j-1} \quad \text{Ерабс} = 1.422 \times 10^6 \quad \frac{\text{В}}{\text{М}}$$

$$\tau\theta_j := \frac{\tau_{\text{И}} \cdot N \cdot \Delta F_j}{\tau_{\Gamma}} \quad \text{Ерабд} = 5.536 \times 10^7 \quad \frac{\text{В}}{\text{М}}$$

$$\eta E_j := \text{Ерабс} \cdot \frac{U_{\text{ср}j}}{U_{\text{с}}} \quad U_{\text{с}} = 1.706 \times 10^3 \quad \text{В}$$

$FU_j =$	$FU_{j-1} =$	$\Delta F_j =$	$\tau\theta_j =$	$\eta E_j =$
$1.35 \cdot 10^{-3}$	$2.3 \cdot 10^{-4}$	0.0011	$5.682 \cdot 10^{-15}$	$8.125 \cdot 10^7$
$6.21 \cdot 10^{-3}$	$1.35 \cdot 10^{-3}$	0.0049	$2.466 \cdot 10^{-14}$	$7.708 \cdot 10^7$
0.0228	$6.21 \cdot 10^{-3}$	0.0165	$8.392 \cdot 10^{-14}$	$7.292 \cdot 10^7$
0.0668	0.0228	0.0441	$2.235 \cdot 10^{-13}$	$6.875 \cdot 10^7$
0.1587	0.0668	0.0919	$4.66 \cdot 10^{-13}$	$6.458 \cdot 10^7$
0.3085	0.1587	0.1499	$7.604 \cdot 10^{-13}$	$6.042 \cdot 10^7$
0.5	0.3085	0.1915	$9.714 \cdot 10^{-13}$	$5.625 \cdot 10^7$
0.6915	0.5	0.1915	$9.714 \cdot 10^{-13}$	$5.208 \cdot 10^7$
0.8413	0.6915	0.1499	$7.604 \cdot 10^{-13}$	$4.792 \cdot 10^7$
0.9332	0.8413	0.0918	$4.66 \cdot 10^{-13}$	$4.375 \cdot 10^7$
0.9772	0.9332	0.0441	$2.235 \cdot 10^{-13}$	$3.958 \cdot 10^7$
0.9938	0.9772	0.0165	$8.392 \cdot 10^{-14}$	$3.542 \cdot 10^7$
0.9986	0.9938	0.0049	$2.466 \cdot 10^{-14}$	$3.125 \cdot 10^7$
0.9998	0.9986	0.0011	$5.682 \cdot 10^{-15}$	$2.708 \cdot 10^7$

4.12 Рассчитаем вероятность разрыва химической связи в диэлектрике под действием рабочей напряженности поля $E_{раб}$ и с учетом перенапряжений

При рабочей напряженности поля при температуре

$$T1 := 258$$

$$x1 := \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T1} \cdot \beta \cdot (\eta \cdot E_{раб} \cdot c)$$

$$x1 = 5.122 \times 10^{-4}$$

$$\phi x1 := \sqrt{1 - 2 \cdot x1} - x1 \cdot \ln \left(\frac{1}{x1} + \frac{1}{x1} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot x1} - 1 \right)$$

$$\phi x1 = 0.995$$

$$q1 := \frac{1}{\tau_0} \cdot e^{\frac{-D \cdot \phi x1}{2 \cdot K \cdot T1}} \quad q1 = 0$$

С учетом перенапряжений

$$x01_j := \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T1} \cdot \beta \cdot \eta E_j$$

$$\phi x01_j := \sqrt{1 - 2 \cdot x01_j} - x01_j \cdot \ln \left(\frac{1}{x01_j} + \frac{1}{x01_j} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot x01_j} - 1 \right)$$

$$q01_j := \frac{1}{\tau_0} \cdot e^{\frac{-D \cdot \phi x01_j}{2 \cdot K \cdot T1}}$$

$x01_j =$	$\phi x01_j =$	$\tau_0_j =$	$q01_j =$
0.029	0.848	5.6824·10 ⁻¹⁵	1.4283·10 ⁻¹³
0.028	0.854	2.4658·10 ⁻¹⁴	9.1537·10 ⁻¹⁴
0.026	0.86	8.3917·10 ⁻¹⁴	5.8323·10 ⁻¹⁴
0.025	0.867	2.2354·10 ⁻¹³	3.6931·10 ⁻¹⁴
0.023	0.873	4.6601·10 ⁻¹³	2.3233·10 ⁻¹⁴
0.022	0.88	7.6043·10 ⁻¹³	1.4514·10 ⁻¹⁴
0.02	0.887	9.7139·10 ⁻¹³	8.9998·10 ⁻¹⁵
0.019	0.894	9.7139·10 ⁻¹³	5.5363·10 ⁻¹⁵
0.017	0.901	7.6043·10 ⁻¹³	3.3765·10 ⁻¹⁵
0.016	0.908	4.6601·10 ⁻¹³	2.0402·10 ⁻¹⁵
0.014	0.915	2.2354·10 ⁻¹³	1.2202·10 ⁻¹⁵
0.013	0.923	8.3917·10 ⁻¹⁴	0
0.011	0.93	2.4658·10 ⁻¹⁴	0
9.756·10 ⁻³	0.938	5.6824·10 ⁻¹⁵	0

$$S1 := \sum_{j=1}^{14} (q01_j \cdot \tau_0_j)$$

$$S1 = 0$$

При рабочей напряженности поля при температуре

$$T2 := 283$$

$$x2 := \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T2} \cdot \beta \cdot (\eta \cdot E_{раб} \cdot c)$$

$$x2 = 4.872 \times 10^{-4}$$

$$\phi x2 := \sqrt{1 - 2 \cdot x2} - x2 \cdot \ln \left(\frac{1}{x2} + \frac{1}{x2} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot x2} - 1 \right)$$

$$\phi x2 = 0.995$$

$$q2 := \frac{1}{\tau_0} \cdot e^{\frac{-D \cdot \phi x2}{2 \cdot K \cdot T2}}$$

$$q2 = 2.115 \times 10^{-15}$$

С учетом перенапряжений

$$x_{02j} := \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T_2} \cdot \beta \cdot \eta E_j$$

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

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

$x_{02j} =$	$\phi x_{02j} =$	$\tau_{6j} =$	$q_{02j} =$
0.028	0.8536	5.6824·10 ⁻¹⁵	1.8642·10 ⁻¹¹
0.026	0.8597	2.4658·10 ⁻¹⁴	1.2615·10 ⁻¹¹
0.025	0.8658	8.3917·10 ⁻¹⁴	8.4937·10 ⁻¹²
0.024	0.8721	2.2354·10 ⁻¹³	5.6881·10 ⁻¹²
0.022	0.8784	4.6601·10 ⁻¹³	3.7877·10 ⁻¹²
0.021	0.8849	7.6043·10 ⁻¹³	2.507·10 ⁻¹²
0.019	0.8914	9.7139·10 ⁻¹³	1.6487·10 ⁻¹²
0.018	0.8981	9.7139·10 ⁻¹³	1.0768·10 ⁻¹²
0.016	0.9049	7.6043·10 ⁻¹³	6.9804·10 ⁻¹³
0.015	0.9118	4.6601·10 ⁻¹³	4.4887·10 ⁻¹³
0.014	0.9188	2.2354·10 ⁻¹³	2.8609·10 ⁻¹³
0.012	0.926	8.3917·10 ⁻¹⁴	1.8057·10 ⁻¹³
0.011	0.9333	2.4658·10 ⁻¹⁴	1.1274·10 ⁻¹³
9.28·10 ⁻³	0.9409	5.6824·10 ⁻¹⁵	6.952·10 ⁻¹⁴

$$2 := \sum_{j=1}^{14} (q_{02j} \cdot \tau_{6j})$$

$$2 = 0$$

При рабочей напряженности поля при температуре

$$x_3 := \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T_3} \cdot \beta \cdot (\eta \cdot E_{рабс})$$

$$\phi x_3 := \sqrt{1 - 2 \cdot x_3} - x_3 \cdot \ln \left(\frac{1}{x_3} + \frac{1}{x_3} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot x_3} - 1 \right)$$

$$q_3 := \frac{1}{\tau_0} \cdot e^{\frac{-D \cdot \phi x_3}{2 \cdot K \cdot T_3}}$$

$$T_3 := 310$$

$$x_3 = 4.616 \times 10^{-4}$$

$$\phi x_3 = 0.996$$

$$q_3 = 5.374 \times 10^{-13}$$

С учетом перенапряжений

$$x_{03j} := \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T_3} \cdot \beta \cdot \eta E_j$$

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

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

x03 _j =	φx03 _j =	τ6 _j =	q03 _j =
0.026	0.8598	5.6824·10 ⁻¹⁵	1.5084·10 ⁻⁹
0.025	0.8657	2.4658·10 ⁻¹⁴	1.0714·10 ⁻⁹
0.024	0.8716	8.3917·10 ⁻¹⁴	7.576·10 ⁻¹⁰
0.022	0.8776	2.2354·10 ⁻¹³	5.3326·10 ⁻¹⁰
0.021	0.8837	4.6601·10 ⁻¹³	3.7351·10 ⁻¹⁰
0.02	0.8899	7.6043·10 ⁻¹³	2.6026·10 ⁻¹⁰
0.018	0.8962	9.7139·10 ⁻¹³	1.8034·10 ⁻¹⁰
0.017	0.9025	9.7139·10 ⁻¹³	1.2422·10 ⁻¹⁰
0.016	0.909	7.6043·10 ⁻¹³	8.501·10 ⁻¹¹
0.014	0.9156	4.6601·10 ⁻¹³	5.7773·10 ⁻¹¹
0.013	0.9224	2.2354·10 ⁻¹³	3.8964·10 ⁻¹¹
0.011	0.9293	8.3917·10 ⁻¹⁴	2.6057·10 ⁻¹¹
0.01	0.9363	2.4658·10 ⁻¹⁴	1.7262·10 ⁻¹¹
8.792·10 ⁻³	0.9435	5.6824·10 ⁻¹⁵	1.1314·10 ⁻¹¹

$$S3 := \sum_{j=1}^{14} (q03_j \cdot \tau6_j)$$

$$S3 = 0$$

При рабочей напряженности поля при температуре

$$T4 := 333$$

$$x4 := \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T4} \cdot \beta \cdot (\eta \cdot E_{рабс})$$

$$x4 = 4.408 \times 10^{-4}$$

$$\phi x4 := \sqrt{1 - 2 \cdot x4} - x4 \cdot \ln\left(\frac{1}{x4} + \frac{1}{x4} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot x4} - 1\right)$$

$$\phi x4 = 0.996$$

$$q4 := \frac{1}{\tau0} \cdot e^{\frac{-D \cdot \phi x4}{2 \cdot K \cdot T4}}$$

$$q4 = 2.962 \times 10^{-11}$$

С учетом перенапряжений

$$x04_j := \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T4} \cdot \beta \cdot \eta E_j$$

$$\phi x04_j := \sqrt{1 - 2 \cdot x04_j} - x04_j \cdot \ln\left(\frac{1}{x04_j} + \frac{1}{x04_j} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot x04_j} - 1\right)$$

$$q04_j := \frac{1}{\tau0} \cdot e^{\frac{-D \cdot \phi x04_j}{2 \cdot K \cdot T4}}$$

x04 _j =	φx04 _j =	τ6 _j =	q04 _j =
0.025	0.8649	5.6824·10 ⁻¹⁵	3.6689·10 ⁻⁸
0.024	0.8706	2.4658·10 ⁻¹⁴	2.6977·10 ⁻⁸
0.023	0.8763	8.3917·10 ⁻¹⁴	1.9758·10 ⁻⁸
0.021	0.8821	2.2354·10 ⁻¹³	1.4412·10 ⁻⁸
0.02	0.888	4.6601·10 ⁻¹³	1.0467·10 ⁻⁸
0.019	0.894	7.6043·10 ⁻¹³	7.5662·10 ⁻⁹
0.017	0.9	9.7139·10 ⁻¹³	5.4426·10 ⁻⁹
0.016	0.9062	9.7139·10 ⁻¹³	3.8943·10 ⁻⁹
0.015	0.9124	7.6043·10 ⁻¹³	2.7705·10 ⁻⁹
0.014	0.9188	4.6601·10 ⁻¹³	1.9588·10 ⁻⁹
0.012	0.9253	2.2354·10 ⁻¹³	1.3756·10 ⁻⁹
0.011	0.9319	8.3917·10 ⁻¹⁴	9.5877·10 ⁻¹⁰
9.689·10 ⁻³	0.9387	2.4658·10 ⁻¹⁴	6.6268·10 ⁻¹⁰
8.397·10 ⁻³	0.9457	5.6824·10 ⁻¹⁵	4.537·10 ⁻¹⁰

$$S4 := \sum_{j=1}^{14} (q04_j \cdot \tau6_j)$$

$$S4 = 0$$

4.13. Найдем время до отказа

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

$$q_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 2.1151 \times 10^{-15} \\ 5.3739 \times 10^{-13} \\ 2.9616 \times 10^{-11} \end{pmatrix} \quad S = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$t_{СП} := \frac{1}{\sum_{i=1}^4 \left[\frac{\tau_i}{\tau} \cdot (q_0 + S) \right]} \quad t_{СП} = 4.9688 \times 10^5 \text{ года}$$

5. Конструктивные расчеты

5.1. Расчет радиуса экрана для выравнивания электрического поля на фланце изолятора

5.1.1. Максимальная напряженность электрического поля у экрана зависит от номинального напряжения, радиуса экрана и высоты изолятора

$$U_n = 70 \text{ кВ} \quad l_d = 0.732 \text{ м}$$

$$R_{эi} := \begin{pmatrix} 0.02 \\ 0.08 \\ 0.18 \end{pmatrix} \quad H := l_d + R_{эi} \quad H = \begin{pmatrix} 0.752 \\ 0.812 \\ 0.912 \end{pmatrix} \quad \text{ORIGIN} := 1$$

$$i := 1..3$$

$$E_{макс_i} := \frac{U_n \cdot 1000}{R_{эi} \cdot \left(1 - \frac{R_{эi}}{2 \cdot H_i} \right)} \cdot \left[1 + 3 \cdot \left(\frac{R_{эi}}{2 \cdot H_i} \right)^2 \right]$$

$E_{макс_i} =$
$3.549 \cdot 10^6$
$9.271 \cdot 10^5$
$4.441 \cdot 10^5$

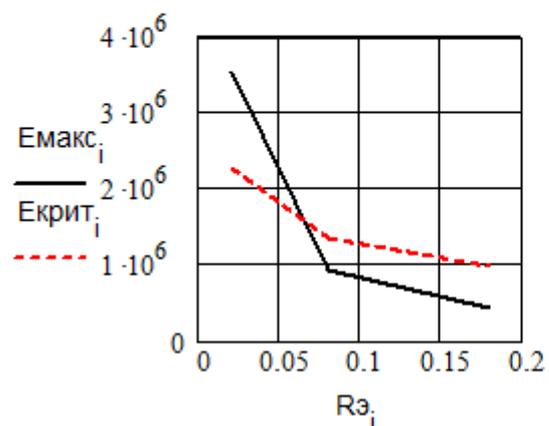
5.1.2. При заданном радиусе экрана критическая напряженность электрического поля, при которой развиваются коронные разряды найдем

$m := 0.8$ коэффициент гладкости поверхности экрана 0,6 - 0,8

$\delta := 1$ относительная плотность воздуха при нормальных условиях

$$E_{крит} := 1.65 \cdot m \cdot \delta \cdot 3 \cdot 10^6 \cdot \frac{0.13}{(\delta \cdot R_{э})^{0.38}} \quad E_{крит} = \begin{pmatrix} 2.276 \times 10^6 \\ 1.344 \times 10^6 \\ 9.877 \times 10^5 \end{pmatrix}$$

5.1.3. Радиус экрана найдем из условия равенства максимальной и критической напряженностей электрического поля. Воспользуемся графическим определением этого условия, что соответствует точке пересечения кривых изменения этих напряженностей от радиуса экрана.



$$R_{э} := 0.08$$

График зависимости $E_{макс}$ и $E_{крит}$ от радиуса экрана.

Точка пересечения этих кривых соответствует радиусу экрана $R_{экр} = 0.08$ м.

