

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Литературный обзор.....	4
1.1 Особенности применения кабельных изделий для питания электрических машин от преобразователя частоты	4
1.2 Специальные кабели для применения в системе ЧРП	14
1.3 Электроизоляционные материалы при производстве кабельных изделий, применяющихся в системах ЧРП	18
1.4 Обзор существующих методов определения стойкости кабельных изделий к электротепловым нагрузкам	29
1.5 Выводы, постановка задач на исследования	32
Глава 2. Методическая часть.....	34
2.1 Конструкция образцов: скрутка из изолированного макетного образца ..	34
2.2 Методика определения стойкости изоляции кабельных изделий к электротепловым нагрузкам	35
Глава 3. Экспериментальная часть.....	37
3.1 Объект исследования макетные образцы: изолированная токопроводящая жила	37
3.2 Определение среднего времени до пробоя изоляции в процессе электротеплового старения	39
3.3 Обсуждение результатов	45
Список используемой литературы	49

Введение

В момент создания частотно-регулируемого привода (ЧРП) имели очень узкую область применения. Их использовали не особо охотно по причине низкой надежности частотных преобразователей. В настоящее время в результате значительного прогресса в области производства силовых полупроводников удалось существенно поднять надежность частотных регуляторов и снизить их стоимость.

При этом использование ЧРП значительно расширило область применения асинхронных двигателей. Например, асинхронные двигатели в составе электрического привода с регулированием по частоте стало возможно использовать в станках. Наиболее популярными можно назвать следующие области применения для ЧРП: регулирование скорости насосов, изменение скорости вентиляторов, управление конвейерным оборудованием.

Частотные регуляторы показывают хорошие результаты при управлении насосами в системах водоснабжения. В этих системах они обеспечивают существенное сокращение расходов за счет сбережения энергии. В системах теплоснабжения ЧРП применяют для управления сетевыми насосами.

Также в настоящее время ЧРП широко применяются в судовых электроприводах большой мощности, прокатных станах, станках с ЧПУ, городском электротранспорте и т.д. Большой экономический эффект даёт применение ЧРП в системах вентиляции, водоснабжения и где применения ЧРП стало практически стандартом.

Несмотря на преимущества ЧРП существуют негативные факторы в системе: перенапряжения на клеммах электродвигателя, дополнительные потери в двигателе и кабеле, высокая скорость нарастания напряжения и электромагнитные помехи. При всем при этом, становится причиной резкого снижения срока службы питающих кабелей и приводит к возникновению аварийных ситуаций.

Глава 1. Литературный обзор

1.1 Особенности применения кабельных изделий для питания электрических машин от преобразователя частоты

Преобразователь частотный (ПЧ) вместе с двигателем позволяет заменить привод постоянного тока. Система регулирования скорости двигателя постоянного тока весьма проста, но привод имеет слабые места – это двигатель, он ненадежен и дорог. Во время эксплуатации возникает искрение щеток, под воздействием электроэрозии изнашивается коллектор.

Асинхронные электродвигатели (АД) превосходят двигатели постоянного тока по многим параметрам: по надежности и простоте устройству, так как нет подвижных контактов. По сравнению с двигателями постоянного тока они имеют меньшую массу, стоимость и размеры при той же мощности. АД просты в эксплуатации и в изготовлении.

Основной недостаток АД – сложность регулирования скорости традиционными методами (изменение питающего напряжения, введением дополнительных сопротивлений в цепь обмоток).

До недавнего времени, управление АД в частотном режиме было большой проблемой, хотя теория частотного регулирования была разработана еще в 30 годах. Развитие ЧРП сдерживалось высокой стоимостью ПЧ. С появлением силовых схем с IGBT-транзисторами, разработка высокопроизводительных микропроцессорных систем управления позволило различным фирмам Европы, Японии и США произвести современные ПЧ доступной стоимости.

Известно, что регулирование частоты вращения исполнительных механизмов можно воспроизводить при помощи разных устройств: гидравлических муфт, механических вариаторов, дополнительно вводимыми в ротор или статор резисторами, статическими ПЧ, электромеханическими ПЧ.

ЧРП — это система управления частотой вращения ротора электродвигателя. Состоит из частотного преобразователя, питающего кабеля и электродвигателя (ЭД).

В основном современные ПЧ построены по схеме двойного преобразования. ПЧ включает в себя: неуправляемый диодный силовой выпрямитель В, конденсатор фильтр Св, дроссель Lв, автономный инвертор АИН, систему управления ШИМ и систему автоматического регулирования, (рисунок 1).

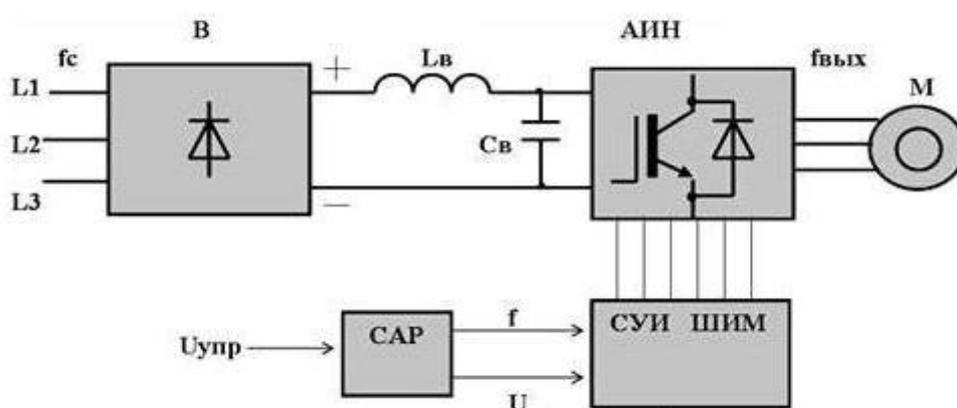


Рисунок 1 – Структурная схема ЧРП

Силовой трехфазный импульсный АИН построен из транзисторных ключей. Обмотка ЭД подключается через соответствующий ключ к положительному и отрицательному выводам выпрямителя. АИН осуществляет преобразование выпрямленного напряжения в трехфазное переменное напряжение нужной амплитуды и частоты, которое прикладывается к обмоткам статора ЭД. В выходных каскадах АИН в качестве ключей используются силовые биполярные IGBT-транзисторы. Если сравнивать их с тиристорами, то они имеют более высокую частоту переключения, что позволяет вырабатывать выходной сигнал синусоидальной формы с минимальными искажениями. Регулирование выходной частоты и напряжения осуществляется в АИН за счет

высокочастотного широтно-импульсного управления. Широтно-импульсное управление характеризуется периодом модуляции, внутри которого обмотка статора ЭД подключается поочередно к положительному и отрицательному полюсам выпрямителя [1].

Длительность подключения каждой обмотки в пределах периода следования импульсов модулируется по синусоидальному закону. Наибольшая ширина импульсов образуется в середине полупериода, а в начале и конце полупериода уменьшаются. Таким образом, система управления обеспечивает широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) напряжения, прикладываемаемого к обмоткам ЭД.

Длительность состояний внутри периода ШИМ модулируется по синусоидальному закону. При высоких (обычно 2...15 кГц) тактовых частотах ШИМ, в обмотках ЭД, вследствие их фильтрующих свойств, текут синусоидальные токи.

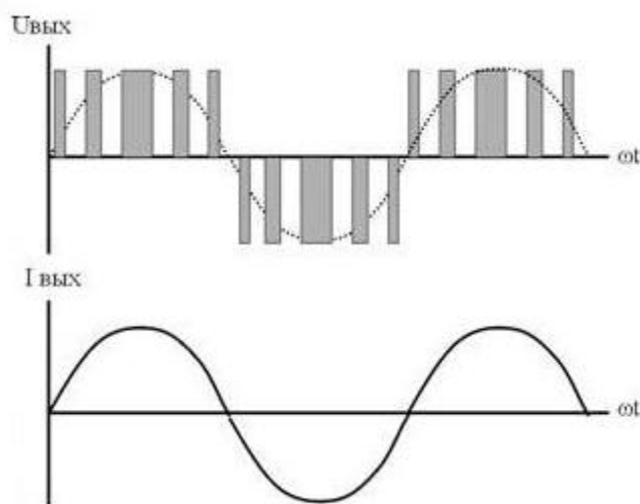


Рисунок 2 – Формы напряжения и тока на выходе ЧРП

Следовательно, форма кривой выходного напряжения представляет собой высокочастотную двухполярную последовательность прямоугольных импульсов, как показано на рисунке 2. Частота импульсов определяется частотой ШИМ, ширина импульсов в течение периода выходной частоты

АИН промодулирована по синусоидальному закону. Форма кривой выходного тока (тока в обмотках ЭД) почти синусоидальна. Регулирование выходного напряжения инвертора может осуществляться двумя способами: широтно-импульсным управлением за счет изменения переключения транзисторных ключей V1-V6 при $U_{вх} = \text{const}$ и амплитудным за счет изменения входного напряжения $U_{вх}$.

Первый способ получил распространение в современных ПЧ благодаря развитию современной элементной базы (IGBT-транзисторы, микропроцессоры). При ШИМ форма токов в обмотках статора ЭД получается близкой к синусоидальной форме благодаря фильтрующим свойствам самих обмоток.

Данное управление позволяет получить высокий КПД преобразователя и эквивалентно аналоговому управлению с помощью амплитуды и частоты напряжения. Современные АИН выполняются на основе управляемых силовых полупроводниковых приборов – биполярных IGBT-транзисторов, либо запираемых GTO – тиристоров с изолированным затвором [2].

Преимущества применения ЧРП являются:

- пусковой момент равный максимальному;
- экономия электроэнергии в случае переменной нагрузки, т.е. работы ЭД с неполной нагрузкой;
- плавный пуск двигателя;
- высокая точность регулирования;
- стабилизация скорости вращения при изменении нагрузки;
- повышенный ресурс оборудования.

Недостатки ЧРП:

- большинство моделей ЧРП являются источниками электромагнитных помех;
- гармонические искажения питающей электрической сети;
- высокий уровень электрических перенапряжений в изоляции;

–сравнительно высокая стоимость оборудования.

Достоинства транзисторных инверторов напряжения с широтно-импульсным управлением в регулируемом АД сочетаются с рядом проблем, одной из которых является проблема «длинного кабеля», соединяющего обмотки ЭД с выходом АИН. Выходное напряжение U_1 АИН с ШИМ представляет собой высокочастотную последовательность прямоугольных импульсов разной полярностью и длительностью с одинаковой амплитудой U_d -величины постоянного напряжения на входе АИН (рисунок 3).

Крутизна фронта t_f импульсов напряжения определяется скоростью переключения силовых ключей АИН и при использовании различных полупроводниковых приборов составляет:

- запираемые тиристоры GTO — 2...4 мкс;□
- однооперационные тиристоры SCR — 4 ...10 мкс;□
- транзисторы IGBT — 0,05...0,1 мкс;
- силовые биполярные тиристоры GTR — 0,5...2 мкс.□

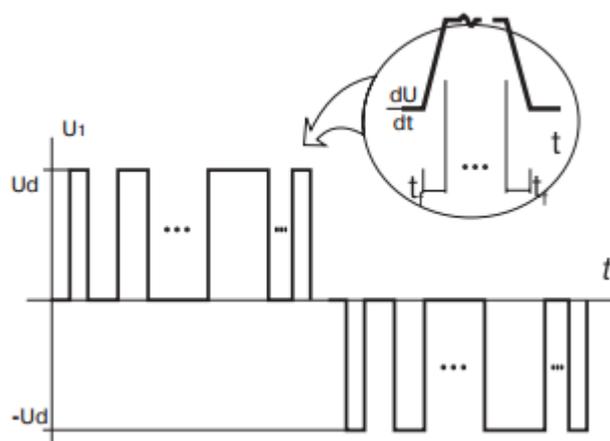


Рисунок 3 – Выходное напряжение с ШИМ

Это связано с протеканием переходных процессов в цепи АИН – питающего кабеля – АД по причине высокого быстродействия транзисторов (рисунок 4) на интервалах времени фронта t_f . Прохождение импульсного сигнала с крутым фронтом вызывает волновые процессы в кабеле,

приводящие к появлению перенапряжений на зажимах ЭД (рисунок 5). Это может сказаться на надежности кабельного изделия, и возможны пробой изоляции [3].

Согласно теории цепей, кабель можно рассматривать как однородную длинную линию с распределенными параметрами, элементарный участок кабеля указан на рисунке 4. Относительной малости параллельной активной проводимостью g_k и последовательным активным сопротивлением r_k участка линии можно пренебречь. Волновое сопротивление Z_0 кабеля определяется последовательной индуктивностью L_k к параллельной емкости C_k участка линии:

$$Z_0 = \sqrt{L_k / C_k} \quad (1)$$

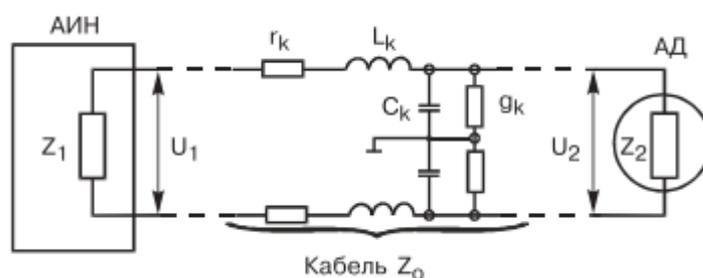


Рисунок 4 – Цепь соединения АИН с АД (эквивалентная схема элементарного участка кабеля)

Значения таких параметров зависят от конструкции, типа и сечения кабельной линии, но как свидетельствуют справочные данные, зависимость незначительна. Для широкого ассортимента монтажных кабелей и проводов усредненные значения этих параметров составляют:

$$L_k = 1 \text{ мкГн/м};$$

$$C_k = 50 \text{ пФ/м}.$$

Тогда волновое сопротивление можно принять $Z_0=100...200$ Ом для всех применяемых в приводах монтажных кабелей и проводов.

Входное сопротивление Z_1 кабеля представлено выходным сопротивлением полупроводниковых вентилях и внутренним сопротивлением батареи конденсаторов (малоиндуктивных) входного фильтра и является малой величиной, которой также можно пренебречь.

Выходным сопротивлением Z_2 кабеля является относительно большое для высокочастотного сигнала входное сопротивление АД, определяемое эквивалентной частотой ω_f фронта импульса напряжения и индуктивностью рассеяния L его обмоток.

Тогда с вышесказанным, что при прохождении импульсного сигнала с крутым фронтом входная часть силового монтажного кабеля электропривода (со стороны инвертора) работает в режиме короткого замыкания, выходная часть кабеля (на зажимах АД) — в режиме холостого хода. С учетом значений параметров волновые характеристики монтажных кабелей и проводов приближаются к характеристикам линии без искажений и потерь.

В такой линии скорость V_f распространения высокочастотной волны определяется по формуле:

$$V_f = \frac{1}{\sqrt{L_k \cdot C_k}} \quad (2)$$

и равно приближенно половине скорости света в вакууме.

Время T_f прохождения импульсного сигнала от выхода инвертора к зажимам АД определяется длиной кабеля.

Если это время больше или равно времени фронта t_f , то в конце кабеля из-за его несогласованности с нагрузкой ($Z_2 \gg Z_0$) возникает отраженная волна напряжения, которая суммируется с прямой волной напряжения U_1 , образуя стоячие волны. В результате на зажимах АД образуется напряжение.

Возвращаясь к началу кабеля, отраженная волна гасится малым входным сопротивлением $Z_1 \ll Z_0$. Поэтому напряжение U_1 на зажимах инвертора не изменяется.

Таким образом, от длины волны λ зависит критическая длина $l_{кр}$ кабеля: кабель, длина которого соизмерима с длиной волны, считается «длинным кабелем». На величину перенапряжений оказывается влияние длина питающего кабеля. Критической считается длина кабеля $l_{кр}$, равная половине длины волны: $l_{кр} \approx \lambda/2$, при которой к обмоткам АД прикладываются импульсы, равные по величине двойному напряжению U_d питания [4].

В приводах на напряжение 0,4 кВ перенапряжение может достигать 1000 В. С учетом характеристик используемых транзисторов в зависимости от мощности привода, типа ЭД и кабеля. Величина $l_{кр}$ может составлять от 7 до 20 м. Значение импульсного перенапряжения в сочетании с высокой крутизной фронта могут привести к снижению срока службы изоляции обмоток ЭД.

Учитывая мировой опыт эксплуатации ЧРП на базе ШИМ, можно отметить следующие обязательные условия для обеспечения надежной работы электрической изоляции кабельных линий и обмоток двигателя:

1. последовательный силовой синусный LC-фильтра на выходе инвертора для уменьшения крутизны фронта импульсов его выходного напряжения;
2. параллельный (слаботочный) RC-фильтра ограничения перенапряжений непосредственно у зажимов двигателя для согласования волнового сопротивления кабеля.
3. применение специальных кабельных и обмоточных проводов, устойчивых к электрическим нагрузкам при частотном управлении.

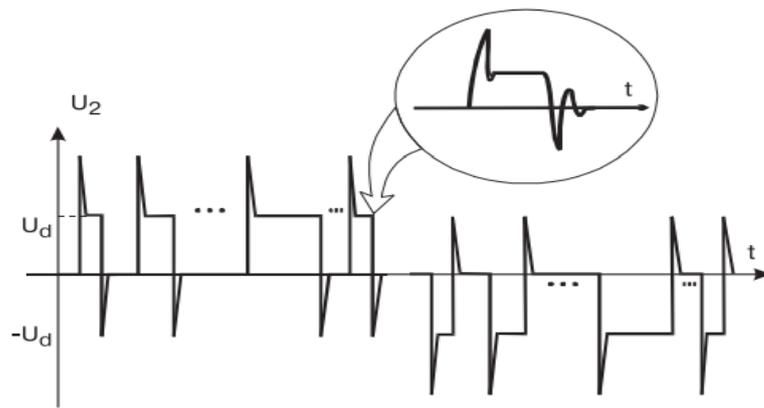
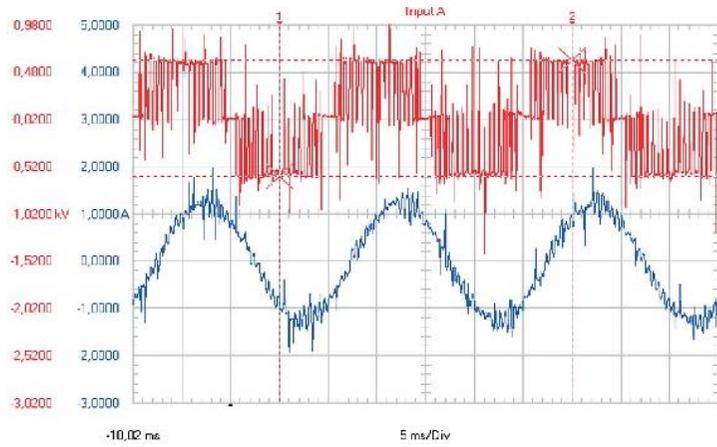
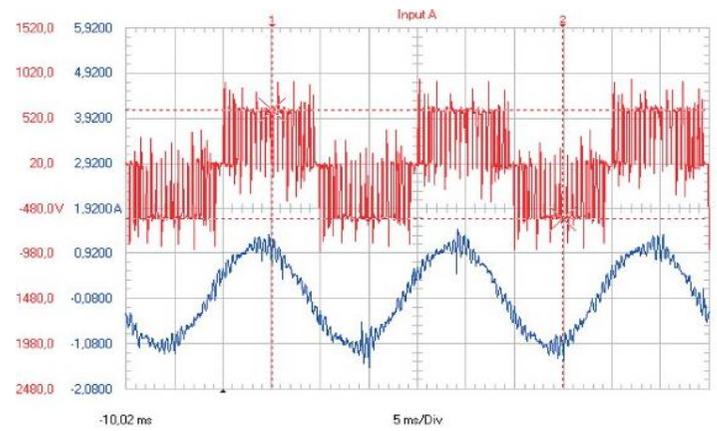


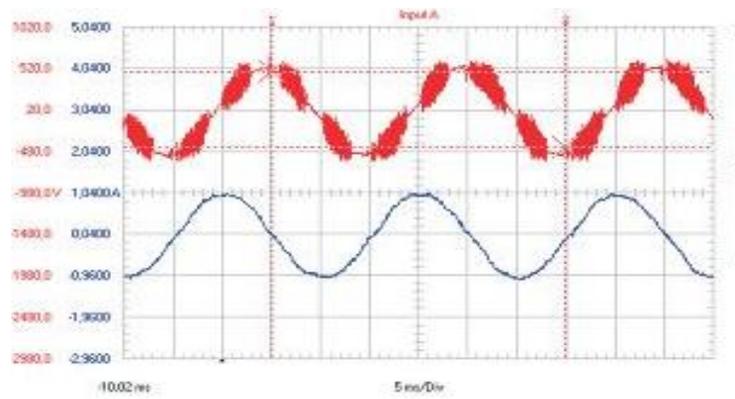
Рисунок 5 – Напряжение на зажимах АД при подключении «длинным кабелем»



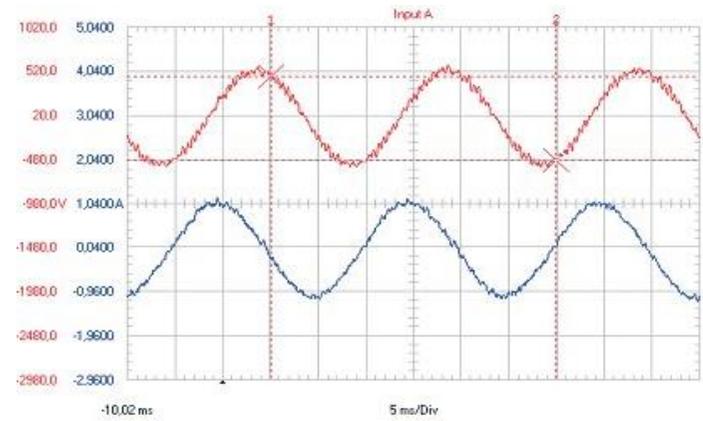
а)



б)



в)



г)

Рисунок 6 – Формы напряжения и тока в системе ЧРП: а) без дросселя; б) с дросселем; в) с моторным дросселем; г) с синус-фильтром

Снижение перенапряжений с помощью дросселей – это самая простая и дешевая защита, они позволяют увеличить время подъема напряжения, за счет этого сглаживаются фронты du/dt , если посмотреть на осциллограмму (рисунок 6, б) напряжения и ток на выходе после дросселя, то эти фронты чуть сглажены и применяется такая защита на длинах до 15м.

Моторные дроссели имеют более высокую индуктивность и лучше компенсируют скачки напряжения, фронты еще более сглаживаются (рисунок 6, в). Данная защита применяется на длинах от 15м до 50м.

Синусоидальные фильтры применяются при длинных кабельных соединениях от 50м и выше (позволяя использовать при этом неэкранированный кабель, который намного дешевле) и в приводных системах во взрывоопасных помещениях (поскольку исключают риск возникновения перенапряжения на клеммах двигателя). Синус-фильтр лучше, чем предыдущие дроссели. Как видно на (рисунке 6, г) фронты почти идеально сглажены. В принципе, все ведущие производители преобразовательной техники рекомендуют применять синусоидальный фильтр.

1.2 Специальные кабели для применения в системе ЧРП

В последнее время рядом ведущих зарубежных компаний (LAPPKABEL, AlphaWire, HELUKABEL, LUTZE, Draka, Belden, и др.) уже разработаны и выпускаются специальные кабели для ЧРП с ШИМ так называемые «VFD-cables» [5,6,7,8].





Рисунок 7 – Современная конструкция кабелей зарубежных производителей «VFD-cables»

Для данных конструкций характерны общие конструктивные особенности: наличие двойного экранирования пленочный экран и экран в виде оплетки обеспечивающих хорошую электромагнитную совместимость. При этом изоляция должна быть короностойкой (например, сшитый полиэтилен).

Обычно пленочные экраны выполняются из металлической фольги. Их основными преимуществами являются легкость и доступная цена. Пленочные экраны хорошо защищают от высокочастотных электромагнитных помех.

Оплетка с 85% перекрытием придает кабелю хорошую гибкость и обеспечивает высокую защиту от низкочастотного излучения.

Электромагнитная совместимость (ЭМС) объединяющим такие известные электромагнитные явления, как перенапряжения, влияние на сеть, радиопомехи, колебания напряжения сети, паразитные связи, электромагнитные влияния, фон промышленной частоты 50 Гц, воздействия заземления и т.д. Определяет ЭМС, как способность технического средства функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам.

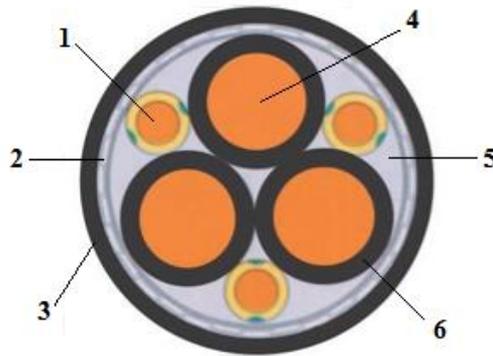


Рисунок 8– Конструкция силового кабеля для ЧРП: 1- медные проводники, 2- экран, 3 – ПВХ оболочка, 4 – компактные медные проводники, 5 - негигроскопичный наполнитель, 6 – изоляция из сшитого полиэтилена.

Существуют отечественные аналоги зарубежных производителей. Например, марка кабеля КГВЭВ. Токопроводящая жила – медная, многопроволочная, круглой формы, 4 или 5 класса гибкости. Изоляция – из поливинилхлоридного пластиката (ПВХ). Скрутка – изолированные жилы кабелей скручены концентрическими повивами. Экран - поверх скрученных жил, выполнен из медных проволок диаметром не более 0.3 мм в виде оплетки плотностью не менее 70%. Оболочка – из ПВХ пластиката.



Рисунок 9 – Отечественная конструкция питающего кабеля марки КГВЭВ

На сегодняшний день в России только осваивают выпуск номенклатуры кабельных изделий адаптированных для системы ЧРП. Например, силовые кабели торговые марки ТОФЛЕКС (производство «Томсккабель» г. Томск) ТОФЛЕКС ЭМС ПвЭаЭлТнг(А)-HF, ТОФЛЕКС

ЭМС ПвЭаЭлВнг(А), ТОФЛЕКС ЭМС РЭаЭлВнг(А)-ХЛ, ТОФЛЕКС ЭМС РЭмЭВнг(А)-LS-ХЛ и т.д [9].

В целом данные кабели можно охарактеризовать как: кабели силовые с гибкими медными жилами, с изоляцией из сшитого полиэтилена (из этиленпропиленовой резины), с оболочкой из полиуретанового эластомера (из поливинилхлоридного пластиката, из холодостойкого поливинилхлоридного пластиката, из полимерных композиций не содержащих галогенов) пониженной горючести (пониженной пожарной опасности, с низким дымо- и газовыделением), с общим комбинированным экраном из алюминиевых лент или гибких материалов на основе алюминиевой фольги и в виде оплетки из медных луженых проволок



Рисунок 10 – Кабель марки ТОФЛЕКС ЭМС ПвЭаЭлВнг(А)

Подробное описание конструкции кабеля ТОФЛЕКС ЭМС приведено на примере марки ПвЭаЭлВнг(А) (конструкция указана на рисунке 10). Токопроводящая жила выполнена из меди, многопроволочная круглой формы, соответствует 5 классу гибкости по ГОСТ 22483. В качестве изоляции основных жил и жил заземления используется сшитый полиэтилен. Скрутка основных изолированных жил скручены в сердечник вместе с изолированными жилами заземления и экранированными парами или сердечником из жил управления (при наличие). Экран – общий

комбинированный из алюмополимерных лент или гибких материалов на основе алюминиевой фольги и в виде оплетки из медных луженых проволок. Наружная оболочка – из ПВХ пластиката пониженной горючести [9].

1.3 Электроизоляционные материалы при производстве кабельных изделий, применяющихся в системах ЧРП

Для питания ЧРП используются различные виды силовых кабелей, как отечественного, так и зарубежного производства. Эксплуатационные свойства кабелей определяются его конструкцией и применяемыми изоляционными материалами.

Поливинилхлоридные пластикаты (ПВХ) являются основными изоляционными и защитными материалами, применяемыми в производстве проводов и кабелей. Представляют композицию полимера – смесь поливинилхлоридной смолы с пластификаторами, стабилизаторами, смазывающими веществами, пигментами и наполнителями. ПВХ получают в результате суспензионной полимеризации хлористого винила в водной среде при давлении 0,4 – 1,2 МПа и температуре 30 – 70°С в присутствии защитных инициаторов и коллоидов. После окончания реакции образуется суспензия, содержащая частицы полимера размером 75 – 150 мкм, легко отделяемые от воды центрифугированием и сушкой.

Сам по себе ПВХ является твердым и жестким, который нельзя использовать в качестве изоляции и оболочки для кабелей и проводов. Однако при добавлении к ПВХ различных ингредиентов его физико-механические свойства и способность к переработке заметно улучшаются.

В частности, улучшается эластичность материала, повышаются его нагневостойкость и долговечность.

В качестве пластификаторов ПВХ обычно используются диоктилсебацианат, диоктилфталат, диизододецилфталат и тому подобные соединения. В состав ПВХ пластиката в качестве стабилизатора вводится

также трехосновой сульфат свинца и стеарат кальция. При уменьшении количества пластификаторов твердость пластика повышается, однако другие параметры (эластичность, морозостойкость) снижаются. Для применения в качестве изоляции обмоточных проводов ПВХ пластикат должен обладать повышенной твердостью и за счет этого обеспечивать возможность намотки электродвигателей в протяжку. Кроме обмоточных проводов, кабельных изделий, используемых в составе станций управления нефтедобывающих установок, кабельная продукция с изоляцией и оболочкой из ПВХ пластификатов широко применяется в системах электроснабжения добывающих скважин, населенных пунктов. Основные параметры кабельного изоляционного ПВХ пластика приведены в таблице 1 [10].

Таблица 1 – Основные параметры ПВХ пластика

Параметры	Значение параметра
Плотность, кг/м ³	1270 – 1350
Разрушающее напряжение при растяжении МПа, не менее	18 – 30
Относительное удлинение, %, не менее	200 – 250
Морозостойкость, °С	- 40
Температура длительной эксплуатации, °С	+70
Температура разложения, °С	+200
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 1000 Гц	0,05 – 0,07
Электрическая прочность при толщине образца 1 мм, МВ/м	45 – 60
Удельное объемное электрическое сопротивление при 20 °С, Ом·м, не менее	10 ¹¹ – 10 ¹³

Полиэтилен (ПЭ) – кристаллический полимер линейного строения с небольшим числом боковых ответвлений. В зависимости от метода получения степень кристалличности может находиться в пределах 55 – 92%. Многие физические свойства полимеров, в том числе полиэтилена, зависят от

молекулярного веса, степени кристалличности и во многом определяются методом их получения.

Сырьем для производства ПЭ является этилен, выделяемый из газовых смесей, получаемых при пиролизе и крекинге нефтепродуктов, попутных и природных газов. Благодаря своим исключительным свойствам, легкости переработки и доступности сырья, полиэтилен находит широкое применение в различных отраслях промышленности. Удачное и редкое сочетание в ПЭ механической прочности, морозостойкости, химической стойкости, хороших диэлектрических свойств, стойкость к радиоактивным излучениям, чрезвычайно низкие влагопоглощение и газопроницаемость, безвредность и легкость делают ПЭ незаменимым в электротехнической промышленности при производстве кабелей и проводов различного назначения.

Известно три основных метода производства ПЭ. Они различаются характером используемых катализаторов и соответственно условиями проведения процесса полимеризации последующих стадий процесса производства. Если для процесса полимеризации применяется кислород или различные перекисные соединения, то процесс полимеризации проводится в довольно жестких условиях – при высоком давлении до 1500 атмосфер и температуре до 200°C (метод высокого давления).

Использование в качестве катализаторов металлоорганических соединений (алкилов и гамогеналкилов алюминия) в смеси с хлоридами титана (или других соединений тяжелых металлов переменной валентности) позволяет проводить процесс при низком давлении ниже 10 атмосфер и температуре не выше 100°C (метод низкого давления).

При применении окислов металлов как катализаторов, например, окислов хрома, нанесенных на алюмосиликат, процесс полимеризации этилена ведут при 30 – 50 атмосфер и 120 – 150°C. Этот метод называется методом производства полиэтилена при средних давлениях (иногда его относят к методу низких давлений). В зависимости от метода производства

полиэтилена конечный продукт обладает различным комплексом свойств. Так, полиэтилен высокого давления является наиболее легким материалом (плотность 0,92 г/см³), эластичным, но обладает меньшими прочностью и теплостойкостью по сравнению с полиэтиленом низкого и среднего давлений. Полиэтилен низкого и среднего давлений обладает прочностью, почти в два раза превышающей прочность полиэтилена высокого давления. Его теплостойкость также выше, чем у полиэтилена высокого давления, на 15 – 20°С. Он является более жестким материалом, плотность его колеблется в пределах 930 – 970 кг/м³[11].

В кабельной технике используют не чистый ПЭ, а различные композиции на его основе. Поскольку в процессе переработки и эксплуатации под воздействием тепла и кислорода воздуха происходит термоокислительная деструкция полиэтилена, то необходимо применять специальные стабилизаторы – антиоксиданты, сдерживающие окисление ПЭ. Композиции ПЭ для кабельной промышленности содержат антиоксиданты в количестве 0,05 – 0,3% (по массе). Следует учитывать, что количество антиоксиданта в изоляции может существенно уменьшиться из-за миграции его из ПЭ. Для большинства антиоксидантов максимум его расхода приходится на 60 – 80°С. Свойства различных композиций ПЭ даны в таблице 2.

Таблица 2 – Свойства различных композиций полиэтилена

Показатель	Обозначение базовой марки			
	102	153	107	178
Показатель текучести расплава (ПТР), г/10 мин. (190 °С; 2,16 кг)	Композиции полиэтилена низкой плотности			
	0,24-0,36	0,21-0,39	1,7 -2,3	1,05-1,95
Стойкость к растрескиванию, ч	500	500	2,5	2,5

Продолжение таблицы 2

Показатель	Обозначение базовой марки					
	204	206	207	208	271	273
Показатель текучести расплава (ПТР), г/10 мин. (190 °С; 5 кг)	Композиции полиэтилена высокой плотности					
	0,6-0,9	0,9-1,5	1,5-2	2-3,	0,4-0,65	0,3-0,55
Стойкость к растрескиванию, ч	100	50	24	24	500	500

Фторопласты – это полимеры, содержащие фтор, образованные из мономеров. К настоящему времени изготавливается несколько типов фторопластов, которые имеют несколько различных марок. Прежде всего, кабели и провода повышенной нагревостойкости для радиоэлектроники и авиационно-космической техники. Применяют в радиочастотных кабелях диэлектрические свойства фторполимеров; в ряде кабельных изделий, особенно малогабаритных, используют высокие механические свойства, а других случаях – химстойкость, радиационную стойкость и негорючесть. Поэтому фторопласты находят широкое применение в радиочастотных кабелях монтажных проводах, проводах и кабелях высокого напряжения, многожильных монтажах кабелях и кабелях управления, бортовых проводах; проводах и кабелях, применяемых в нефтегазовой индустрии: для атомных электростанций и др.

Наиболее широко применяется политетрафторэтилен (ПТФЭ). В кабельной промышленности используют в виде порошков, суспензии и пленок. Степень кристалличности ПТФЭ после полимеризации достигает 93 – 98%, а после переработки в зависимости от молекулярной массы (молекулярная масса от $4 \cdot 10^5$ до 10^7) и режима охлаждения она обычно составляет 50 – 85% [12].

Поливинилиденфторид (ПВДФ) получают полимеризацией винилиденфторида. ПВДФ-типичный термопластичный полимер, перерабатываемый методом экструзии; он наиболее прочный и жесткий из всех фторопластов с высокой стойкостью к истиранию. Степень кристалличности достигает 60 – 80%. Используется в кабельной промышленности модифицированный ПВДФ отличается меньшей степенью кристалличности (около 30%), лучшей морозостойкостью и технологичностью.

Сополимеризацией гексафторпропилена с тетрафторэтиленом получают фторированный этиленпропилен (ФЭП). Это тоже термопластичный фторполимер, применяется в кабельной сфере, в виде экструдированного материала и в виде суспензий и пленок. ФЭП объединяет в себе способность экструдироваться и высокие диэлектрические свойства ПТФЭ.

В кабельной промышленности широкое применение нашел сополимер этилена и тетрафторэтилена (ЭТФЭ). Степень кристалличности ЭТФЭ зависит от количественного соотношения мономера в сополимере и регулярности чередования мономерных звеньев и обычно составляет 40 – 60%. ЭТФЭ, уступая ФЭП и ПТФЭ по своим диэлектрическим свойствам, превосходит их по радиационной стойкости и механическим свойствам. Данный сополимер также можно перерабатывать методом экструзии.

Перспективным материалом является сополимер тетрафторэтилена с перфтор- (алкилвиниловыми) эфирами (ПФА), в котором сочетаются хорошие диэлектрические свойства, химическая стойкость и нагревостойкость ПТФЭ со способностью экструдироваться [13].

Перечень термопластичных фторполимеров, применяются в кабельной промышленности, перерабатываемых методом экструзии, и важнейшие свойства фторполимеров приведены в таблице 3. Область применения – в таблице 4.

Таблица 3 – Основные свойства фторополимеров

Показатель	ПТФЭ	ФЭП	ЭТФЭ	ПВДФ	ПФА
Плотность, кг/м ³	2120-2280	2120-2170	1630-1700	1700-1800	2120-2170
Температура плавления, °С	327	265-290	260-275	160-180	302-310
Максимальная температура длительной эксплуатации, °С	260	200	200	150	260
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	14,5-35	16-30	27-50	39-60	28-32
Относительная диэлектрическая проницаемость при 10 ⁶ Гц	1,9-2,2	1,9-2,1	2,5-2,6	6,4	2,06-2,1
Тангенс угла диэлектрических потерь при 10 ⁶ Гц	2·10 ⁻⁴	(3-8)·10 ⁻⁴	(4-7)·10 ⁻³	17·10 ⁻²	3·10 ⁻⁴

Таблица 4 – Область применения фторполимеров

Тип сополимера	Марка	Область применения
ФЭП	Фторопласт – 4МБ	Оболочка и изоляция различных кабелей и проводов
ЭТФЭ	Фторопласт – 40Ш	Оболочка кабелей и изоляция проводов различного назначения
ПВДЭ	Фторопласт – 2М	Изоляция проводов с высокой стойкостью к механическим воздействиям
ПФА	Ф – 50	Изоляция с высокой стойкостью к механическим воздействиям

Термоэластопласты (ТЭП), или термопластичные эластомеры, по своим характеристикам занимают промежуточное положение между резинами и пластмассами. Термоэластопласты могут перерабатываться методом экструзии, являющимся базовым в кабельной технике. Необходимо учитывать, что ТЭП резиноподобны, но не являются резиной.

Термоэластопласты сочетают высокоэластичные свойства резин и способность выше температуры текучести переходить в состояние расплава и перерабатываться методом экструзии. Преимущества ТЭП:

- повышение производительности и уменьшение трудо- и энергозатрат при переработки;
- снижение материалоемкости за счет пониженной плотности;
- возможность полной утилизации отходов;
- более полное удовлетворение экологическим требованиям.

Недостатком ТЭП по сравнению с резинами с точки зрения применения в кабелях и проводах является свойственная любому термопластичному материалу способность плавиться при повышенных температурах. Термоэластопласты более дороги: их рецептуру нельзя «разбить» большим количеством наполнителей. Кроме того, ТЭП имеют недостаточно высокую химическую стойкость и теплостойкость.

Все ТЭП по способу получения можно подразделить на две большие группы: 1- блоксополимеры, макромолекулы которых состоят из различных по химическому строению и свойствам блоков, и композиции на их основе (собственно ТЭП); 2 - механические смеси полимеров (динамические ТЭП). Наиболее распространенными являются полиолефиновые ТЭП на основе этиленпропиленовых каучуков и полипропилена. Все ТЭП классифицируются на полиуретановые, стирольные, полиэфирные и полиолефиновые. В кабельном производстве используются полиолефиновые, полиэфирные и полиуретановые ТЭП [14].

Полиолефиновые ТЭП, как правило, представляют собой механическую смесь этиленпропиленового каучука с полиолефинами (полиэтиленом, полипропиленом, их блоксополимерами и т.д.). Смесь эластомера и термопластичного материала состоит из мелких частиц эластомера, распределенных в небольшом количестве термопласта. Полиолефиновые ТЭП могут быть сшитыми и несшитыми. Одна из фаз может быть сшитой, в то время как полимерная смесь в целом сохраняет

текучесть при температуре выше температуры стеклования кристаллической фазы олефинового мономера.

Фактически в этом случае ТЭП представляет собой двухфазную систему, в которой взаимодействие между фазами осуществляется за счет физических связей с образованием протяженного граничного слоя. Тем не менее, лучшие характеристики имеют полиолефиновые ТЭП при полном сшивании эластомера, входящего в состав ТЭП. Температура смешивания при производстве таких ТЭП должна быть на 25 – 40°С выше температуры плавления термопласта, что обеспечивает в совокупности со сдвигами деформациями активацию и завершение вулканизации эластомерной фазы (динамическая вулканизация). По сравнению с механическими смесями каучук-термопласт, так же, как и динамические вулканизаты, обладает улучшенными физико-механическими свойствами, повышенной стойкостью к агрессивным средам, повышенной маслостойкостью, более высокой нагревостойкостью, повышенной прочностью.

ТЭП на основе полиуретанов позволило открыть новый класс материалов с высокими эксплуатационными характеристиками, такие как покрытия, адгезивы (клеи), эластомеры, волокна и пены (пористые материалы). Оказалось, что образующиеся по простой реакции полиуретаны являются поистине универсальными полимерами. Из большого разнообразия используемых химических веществ могут быть получены материалы с различными специализированными свойствами. Термоэластопласты на основе полиуретана (ТПУ) стали первыми однородными эластомерами, для которых используются методы переработки термопластов. В настоящее время эти материалы играют очень важную роль в быстро развивающейся сфере ТЭП.

Термопластичные полиуретаны обычно получают из длинноцепных диолов со средней молекулярной массой от 600 до 4000, удлинителей цепей с молекулярной массой от 61 до 400 и полиизоцианатов.

Среди большого разнообразия потенциально возможных исходных материалов практический интерес представляет только довольно ограниченное количество соединений. Однако из-за большого разнообразия возможных комбинаций жестких и гибких сегментов могут быть получены ТПУ, являющиеся как гибкими и эластичными материалами, так и более жесткими, хрупкими, с высоким значением модуля упругости пластмассами.

ТПУ обладают превосходными механическими характеристиками, а именно — высоким пределом прочности при растяжении и относительным удлинением при разрыве. Чрезвычайно высокая стойкость таких материалов к распространению трещин и абразивному износу способствует их широкому применению для изготовления изделий, длительное время эксплуатирующихся при относительно жестких условиях. Свойства материалов зависят от температуры, а также от твердости [15].

Полиуретаны могут использоваться в широком диапазоне температур. Большинство изделий, изготовленных из ТПУ, могут использоваться при температурах от -40 до 80°C для случаев как кратковременной, так и длительной эксплуатации. ТПУ обладают кратковременной стойкостью к действию температур до 120°C , хотя в некоторых случаях материалы могут выдерживать действие и более высоких температур. Природа жестких сегментов оказывает наибольшее влияние на рабочие характеристики материала в условиях повышенных температур эксплуатации; чем выше жесткость материала (чем больше в молекуле изоцианата и удлинителя цепи), тем выше значение допустимой температуры эксплуатации. Помимо зависимости от количества удлинителей цепи, рабочие характеристики в условиях повышенных температур зависят также и от типа удлинителя цепи.

Тип диизоцианата также влияет на рабочие характеристики в условиях повышенных температур.

Механические характеристики, такие как жесткость и эластичность, зависят от температуры.

ТПУ обладают превосходной устойчивостью к действию чистых минеральных масел, дизельного топлива и жиров. Некоторые технические масла и смазки могут влиять на свойства ТПУ при повышенных температурах вследствие наличия в них добавок. Поэтому рекомендуется осуществлять проверку влияния масел на свойства ТПУ при конкретных условиях эксплуатации.

В хлорированных углеводородах или ароматических жидкостях, таких как толуол, ТПУ подвергаются значительному разбуханию. Степень разбухания зависит от структуры полиуретана. ТПУ на основе сложных эфиров разбухают в меньшей степени, чем ТПУ на основе простых эфиров, а жесткие полиуретаны разбухают в меньшей степени, чем гибкие полиуретаны.

Некоторые полярные растворители (например, тетрагидрофуран, метилэтилкетон или диметилформамид) способны частично или полностью растворять ТПУ. Например, гибкие линейные полиуретаны могут растворяться в смеси метилэтилкетона и ацетона и использоваться в растворенном состоянии в виде клеев (адгезивов), тогда как более жесткие линейные полиуретаны растворяются и используются для изготовления текстильных и кожаных покрытий.

Обычно ТПУ являются устойчивыми к действию углеводородов нефти, если не содержат примесей спиртов. В топливе, содержащем ароматические соединения или спирты, такие полимеры подвергаются значительному разбуханию; степень разбухания зависит от количества компонентов.

1.4 Обзор существующих методов определения стойкости кабельных изделий к электротепловым нагрузкам

При работе привода возникают электрические нагрузки высокой интенсивности, которые действуют на изоляцию в течение всего времени эксплуатации при рабочей температуре.

Электроизоляционные материалы кабельных изделий должны обладать необходимой стойкостью к частичным разрядам, к дугостойкости, к коронным разрядам, а также к действию электротепловому старению.

При повышенной напряженности электрического поля в отдельных элементах изоляции могут происходить разряды (пробой), которые не приводят к полному пробое изоляционной конструкции. Такие разряды получили название частичных разрядов.

Частичный разряд (ч.р.) – это частичный электрический пробой в диэлектрическом материале, который возникает главным образом в газовых включениях, но могут присутствовать в водяных прослойках внутри изоляции, посторонних в скоплениях, в результате чего образуется пространство между проводником и экраном. Единица измерения частичного разряда – пикоКулон (пКл). Появление ч.р. в газовых включениях приводит к возрастанию потерь энергии в диэлектрике и увеличению его $\text{tg}\delta$. Появления ч.р. – начальная стадия развития большинства дефектов в высоковольтной изоляции [16].

На участке роста приложенного к зоне дефекта напряжения возникает один или несколько ч.р., приводящих к перенапряжению потенциалов внутри объема изоляции.

Если дефект располагается ближе к внешней поверхности изоляции, к более высокому потенциалу, то ч.р. будет больше на положительной полувольтне питающего напряжения и меньше на отрицательной. Если дефект располагается ближе к «земляному» потенциалу, то наоборот, разрядов будет больше на отрицательной полувольтне питающего напряжения.

Испытания проводятся на установке, позволяющий отделять импульсы ч.р. от приложенного напряжения переменного тока частота 50 Гц, между токопроводящей жилой и экраном. Установка состоит из высоковольтного трансформатора, генератора, киловольтметра и осциллографа.

Чувствительность установки не ниже 2 пКл. Разделка и подключения проводов выполнялись, так чтобы были исключены разряды на концах образцов. Напряжение начала ч.р. в изоляции определялось с помощью киловольтметра при плавном повышении напряжения и фиксации возникновения ч.р. с помощью осциллографа, интенсивность разрядов не должна повышать 2 пКл. Время приложения напряжения к изоляции провода составляло 1 минуту.

Методы определения стойкости электроизоляционных материалов к действию дуги.

Дугостойкость диэлектрика представляет собой способность выдерживать воздействие электрической дуги без недопустимого ухудшения его свойств.

Различают стойкость электроизоляционных материалов к действию электрической дуги при высоком (свыше 1000 В) переменном напряжении и малых токах и при воздействии дуги, создаваемой постоянным напряжением до 1000 В. Существующие методы испытаний не дают возможности распространить результаты испытаний, проводимых в условиях лабораторий, на рабочие условия применения материалов при наличии грязи, пыли, влаги. Выбор метода испытаний зависит от особенностей испытуемого материала, его назначения и т.д.

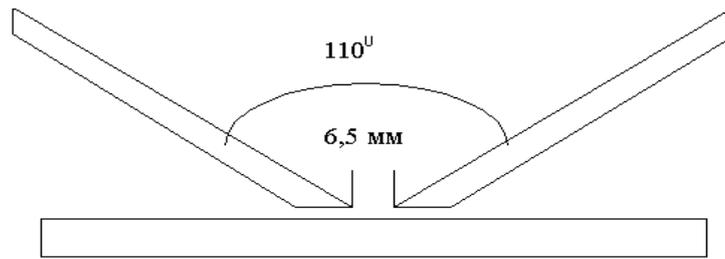


Рисунок 11 – Определение стойкости к воздействию электрической дуги напряжения переменного тока

Два электрода, к которым приложено переменное напряжение, располагают достаточно близко к поверхности образца. Возникающая дуга воздействует на испытуемый материал и вызывает возникновение токопроводящей перемычки между электродами.

Вследствие шунтирования воздушного промежутка перемычкой дуга гаснет. Таким образом, момент появления перемычки фиксируется по погасанию дуги. Параметрами дугостойкости является в данном случае ток I_d и время t_d , необходимое для образования перемычки. Толщина образцов не менее 3 мм. Напряжение на электродах 12,5 кВ при токе от 10 до 100 мА [17].

Методы определения стойкости электроизоляционных материалов к действию поверхностных (коронных) разрядов.

Короностойкость диэлектрика представляет собой способность выдерживать влияние коронного разряда без недопустимого ухудшения свойств. Корона может формироваться с течением времени из-за износа электродов и старения изоляции. Она ограничена относительно узкой областью, прилегающей к электроду. Под воздействием короны и образующихся под ее влиянием химических соединений происходит эрозия изоляционного материала, которая может достигать такой степени, что оставшаяся изоляция не выдерживает приложенного напряжения и происходит пробой. Возможно также изменение физических свойств

материала под действием короны: материал изменяет размеры, становится хрупким, трескается, выделяет газы.

Параметрами, используемыми для сравнительной оценки материалов в условиях короны, служат: начальное напряжение короны U_a — минимальное напряжение, при котором наблюдается корона, критическое напряжение короны $U_{кор}$ — напряжение, при котором процесс заканчивается пробоем образца через определенное для данных условий испытаний время $t_{кор}$, время $t_{кор}$ — время от начала воздействия короны до момента пробоя. Сущность метода испытаний заключается в том, что к образцу прикладывают напряжение, достаточное для возникновения короны, и выдерживают его до пробоя образца [18, 19].

Методы определения стойкости электроизоляционных материалов к электротепловым нагрузкам.

Сущность метода на тепловое старение изоляции сводится к тому, что образцы помещаются в специальные термошкафы, либо камеры, в которых они выдерживаются в течение определенных промежутков времени при повышенных температурах, обычно лежащих в пределах от 60 до 130°C в зависимости от материала. В особых случаях, помимо воздействия нагрева на образцы, может даваться одновременно воздействие других факторов, например, электрического поля. Для твердой изоляции наиболее характерным является постепенное снижение механической прочности в процессе теплового старения, что приводит к повреждению изоляции под действием механических нагрузок и затем к ее пробую.

1.5 Выводы, постановка задач на исследования

Проанализировав процессы, происходящие в ЧРП на базе ШИМ, а также их влияние на элементы системы, можно сделать следующие выводы:

1. При работе ЧРП на базе ШИМ возникают электрические перенапряжения, которые негативно сказываются на сроке службы изоляции

кабеля. В связи с этим необходимо учитывать способность электрической изоляции выдерживать подобные нагрузки.

2. В настоящее время в технической литературе недостаточно рекомендаций по проведению подобных испытаний.

3. Недостаточно информации по стойкости изоляционных материалов к подобным нагрузкам. Это в свою очередь не дает возможности обосновано выбрать материалы для таких кабельных изделий.

4. Для отечественной кабельной промышленности это сравнительно новый тип кабеля и в связи с этим также недостаточно информации об опыте применения таких кабелей.

При исследовании стойкости изоляции кабельных изделий к повышенным электротепловым нагрузкам характерны для работы ЧРП на базе ШИМ является задачей актуальной, поскольку это позволит обоснованно выбрать материал, дать рекомендацию по их применению и обеспечит надежную работу для эксплуатации при действии подобных нагрузок. В связи с этим в работе ставится цель: провести сравнительную оценку стойкости изоляции макетных образцов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить характер и величины электрических перенапряжений в питающих кабелях ЧРП.

2. Отработать методику проведения эксперимента по оценке стойкости изоляции питающих кабелей в системе ЧРП к действию электротепловых нагрузок.

3. Провести сравнительные испытания на стойкость изоляции образцов кабельных изделий к электротепловым нагрузкам.

4. Разработать рекомендации по применению материалов для изоляции питающих кабелей с учетом особенностей эксплуатации в системах ЧРП.

Глава 2. Методическая часть

2.1 Конструкция образцов: скрутка из изолированного макетного образца

Макетные образцы проводов в виде прямых отрезков длиной около 400 мм с удаленными с обоих концов изоляцией складываются пополам и скручиваются на длине (125 ± 5) мм с помощью специального устройства. Схема устройства приведена на рисунке 12.

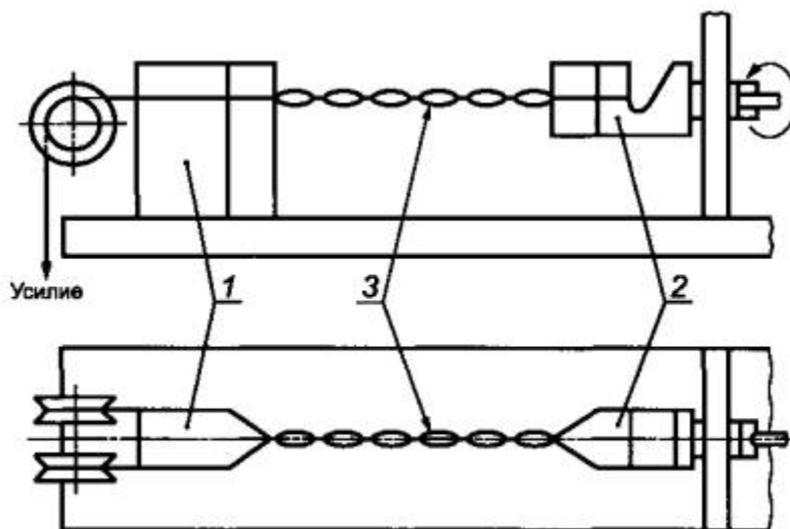


Рисунок 12 – Устройство для скручивания образцов

1 – неподвижная распорка; 2 – вращающий крюк-распорка; 3 – образец.

Концы проводов должны быть соединены. Число скруток в зависимости от диаметра проволоки должно соответствовать указанному в таблице 5. Петлю на конце скрученного участка образца разрезают, для того чтобы обеспечить максимальное расстояние между образовавшимися концами. При раздвижении двух концов провода следует избегать резких перегибов или повреждения изоляции [20].

Таблица 5 – Зависимость числа скруток от диаметра проволоки

Номинальный диаметр проволоки, мм	Число кручений
0,355-0,5	16
0,5-0,71	12
0,71-1,06	8
1,06-1,4	6
1,4-2,0	4

2.2 Методика определения стойкости изоляции кабельных изделий к электротепловым нагрузкам

Для испытаний к электротепловым нагрузкам используется установка, электрическая схема которой приведена на рисунке 13.

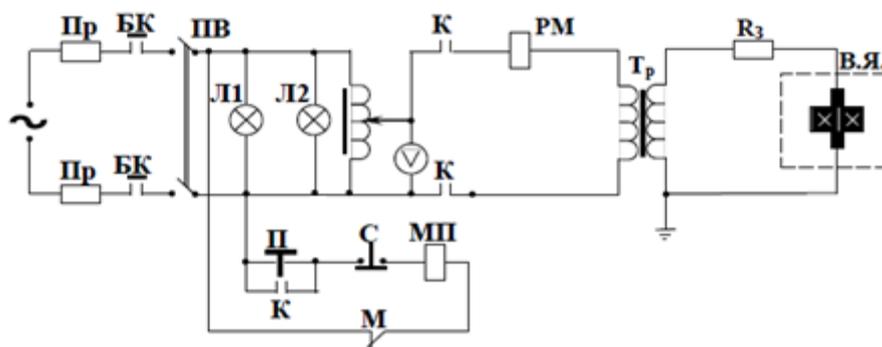


Рисунок 13 – Электрическая схема установки для испытаний изоляции

Где В.Я. – высоковольтная ячейка; МП – магнитный пускатель; П, С – кнопки «Пуск», «Стоп»; БК – блокировка; Л1, Л2 – сигнальные лампы низкого и высокого напряжения; Пр – предохранительные вставки; РМ – реле максимального тока.

Испытания проводятся на лабораторном стенде для испытания электрической изоляции. Испытуемые макетные образцы проводов (скрутки) помещаются в термошкаф, нагретый до температуры класса нагревостойкости, после чего подают напряжение переменного тока.

Образцы испытываются напряжением: промышленной частотой с амплитудой от 1200 В, частота 400 Гц с частотой (модуляции) квантования напряжения 5 кГц с (длительность фронта волны) крутизной нарастания переднего фронта 4 мкс; синусоидальным напряжением частотой 1 кГц. При испытаниях должно быть хорошо видно синее свечение короны по поверхности скрутки. Подобные условия адекватно воспроизводятся уровнем воздействующих на изоляцию нагрузок при частотном управлении. Общая схема проведения испытаний на установке приведена на рисунке 14.

Определяется время до пробоя образцов от момента подачи напряжения до пробоя и за результат применяется среднее арифметическое не менее чем 10 образцов при напряжении 5 и 7 кВ; при частотах 50 Гц и 1 кГц; при температурах 70, 90, 120, 130 и 140°C (в зависимости от материала изоляции).

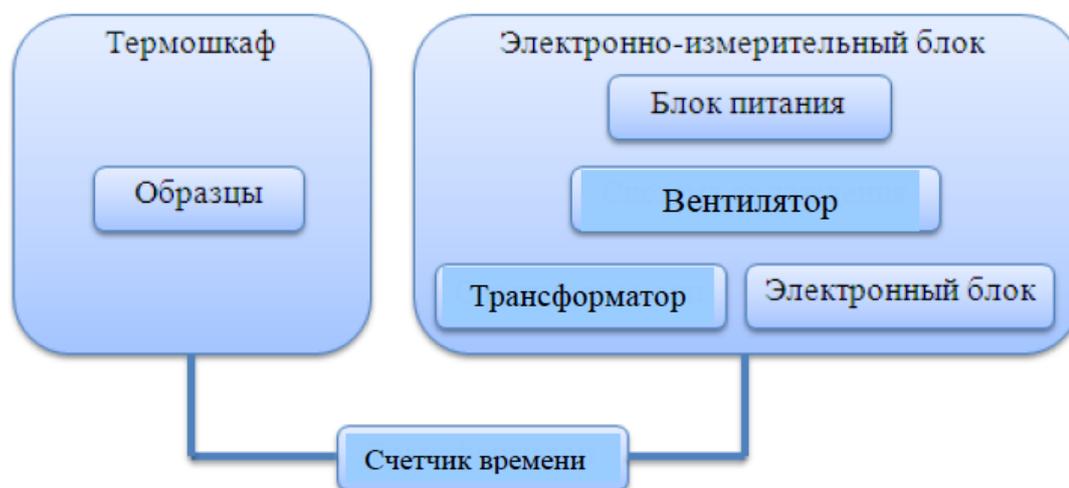


Рисунок 14 – Блок-схема испытательной установки

Глава 3. Экспериментальная часть

3.1 Объект исследования макетные образцы: изолированная токопроводящая жила

Изоляция блоксополимер этилен-пропиленовая.

Основным представителями большого класса полимерных материалов-полиолефинов наряду с ПЭ является полипропилен (ПП), сополимеры пропилена с этиленом. ПП имеет более высокие жесткость, стойкость к растрескиванию, твердость, температуру плавления и теплостойкость. ПЭ имеет хорошую морозостойкость, высокую стабильность к свето- и термостарению.

Были получены в конце 50-х годов образцы нового класса сополимера пропилена и этилена, синтезированных путем их и последовательной полимеризации. Эти полимеры стали называться блоксополимерами, как было установлено в последующие годы, они являются композициями гомополимеров и блоксополимеров. Данные композиции в широком диапазоне сочетают в себе свойства ПП и ПЭ и намного превосходят по свойствам механические смеси ПП и ПЭ. Для них характерны высокая прочность при динамических испытаниях на изгиб, повышенная стойкость к растрескиванию, высокая ударная вязкость и морозоустойчивость, хорошее качество поверхности изделий, низкая усадка. Изделия из блоксополимеров более стойки к образованию трещин, чем ПП. Трубки и шланги из блоксополимера выдерживают расширение замерзшей воды.

Следует еще раз отметить, что при гибкости свойственной полиэтилену, изоляция кабельных изделий из блоксополимеров обладает высокой стойкостью к растрескиванию, допускает их использование при более высокой температуре в течение продолжительного времени. Высокие механические свойства блоксополимеров сочетаются с химической инертностью и высокой стойкостью к грибкам плесени, бактериям и

насекомым, такие как термиты. Также они обладают высокой стойкостью к раздавливанию, прорезанию и истиранию в широком диапазоне температур. Композиция блоксополимера этилен-пропилена устойчива к воздействию повышенных температур.

Изоляция полиэтиленовая (ПЭ).

ПЭ изоляция изготавливается на основе полиэтиленов низкой плотности (ПЭНП) и полиэтиленов высокой плотности (ПЭВП). ПЭНП получают полимеризацией этилена при высоком давлении, а ПЭВП - при низком давлении с применением металлоорганических катализаторов. Маркировка композиций на основе ПЭНП включает трехзначные цифры, начинающиеся с единицы: 102,107 и т.д. Маркировка на основе ПЭВП - цифры, начинающиеся с двойки: 204,206 и т.д., (наиболее подробные основные базовые свойства приведены в разделе 1 и в таблице 2).

Изоляция кабельных изделий, применяемых в нефтегазовой индустрии, используются марки и рецептуры материалов, обладающие наилучшим комплексом свойств для эксплуатации в воде; в скважинной жидкости; на открытом воздухе: стойкостью к растрескиванию, высокими механическими и электрическими свойствами, чистотой и минимальным количеством стабилизирующих добавок.

Применение ПЭ для изоляции кабелей силовых установки электроприводного центробежного насоса (УЭЦН), обмоточных проводов, самонесущих изолированных проводов одним из важнейших параметров изоляционного материала является стойкость к растрескиванию. Стойкость полиэтилена к растрескиванию связана с целым рядом факторов, в частности, хорошо известно, что она пропорциональна молекулярной массе. Молекулярная масса ПЭ косвенно может определяться по показателю текучести расплава, который выражается массой вещества, проходящего при 190°C в течение 10 минут через стандартное сопло. Наилучшей стойкостью к растрескиванию обладает ПЭ с индексом расплава 0,3 – 0,7 г/10 мин.,

который и применяется в производстве кабельных изделий для нефтегазового комплекса.

Изоляция полиуретановая (ПУ).

ПУ изоляция обладает хорошими свойствами. У них высокая физико-механические характеристики: сопротивление растяжению 20-60 МПа при удлинении 300-600%. Основной характеристикой является высокая стойкость к истиранию, царапинам, раздиру, а также ударопрочность. Они обладают хорошими показателями стойкости к окислительной деструкции, озоностойкостью, стойкостью к алифатическим углеводородам, парафиновым и нефтяным маслам и даже к действию натрия и 20% серной кислоты. Также стойки к температурам и плесени. Согласно классификации МЭК, провода и кабели с ПУ изоляцией относятся к классу нагревостойкости Е (110 – 120°C).

Недостатком изоляции относится выцветание под действием УФ-излучения, плохая стойкость к полярным растворителям и особенно к гидролизу при высокой температуре (подробнее про данный материал приведено в разделе 1).

3.2 Определение среднего времени до пробоя изоляции в процессе электротеплового старения

В соответствии с методикой в пунктах 2.1 и 2.2 были подготовленные макетные образцы для испытаний, и было определено среднее время до пробоя изоляции макетных образцов. Испытания проводились на электрической установке, блок-схема которой приведена на рисунке 14.

Для проведения испытаний макетных образцов на переменном напряжении повышенной частоты использовался электронный блок для генерации напряжения высокой частоты. Образцы испытывались на напряжение 5 и 7 кВ при частоте 50 Гц и 1 кГц (ЗАСИ-30); температура испытаний 70, 90, 120, 130 и 140°C [21].



Рисунок 15 – Высокочастотный аппарат контроля изоляции
«ЗАСИ – 30»

Для определения среднего времени до пробоя изоляции из блоксополимера этилен-пропилена при высоких частотах электротепловых нагрузок за результат принимается среднее арифметическое не менее чем 10 образцов при напряжении 5 и 7 кВ; температура испытаний 130 и 140°C; при промышленной частоте 50 Гц и при высокой частоте 1 кГц.

Для определения среднего времени до пробоя изоляции из полиуретана, при высоких частотах на каждую партию испытано не менее 10 образцов приложенного напряжения 7 кВ; температура испытаний 120 и 130°C; при высокой частоте 1 кГц.

Для определения среднего времени до пробоя изоляции из полиэтилена на каждую партию испытывалась не менее 10 образцов приложенного напряжения 5 кВ; температура испытаний 70 и 90°C; при промышленной частоте 50 Гц и при высокой частоте 1 кГц.

Результаты испытаний представлены в таблицах 6,7, 8 и 9 на рисунке 16 и 17.

Таблица 6 –Результаты испытаний макетных образцов с изоляцией из блоксополимер этилен-пропилена

Т°С/ U _{исп} , кВ	№ образцов	Время до пробоа, мин	Среднее время до пробоа, мин
Старение при высокочастотных электрических нагрузках			
140/7	1	103	91,3
	2	109	
	3	118	
	4	120	
	5	120	
	6	54	
	7	60	
	8	65	
	9	72	
	10	92	
130/7	1	108	98,9
	2	111	
	3	113	
	4	118	
	5	119	
	6	75	
	7	76	
	8	87	
	9	89	
	10	93	
140/5	1	200	172,6
	2	213	
	3	216	
	4	233	
	5	242	
	6	75	
	7	120	
	8	125	
	9	137	
	10	165	
130/5	1	185	202,2
	2	197	
	3	201	
	4	213	
	5	215	

Таблица 7 – Результаты испытаний макетных образцов с изоляцией из блоксополимер этилен-пропилена

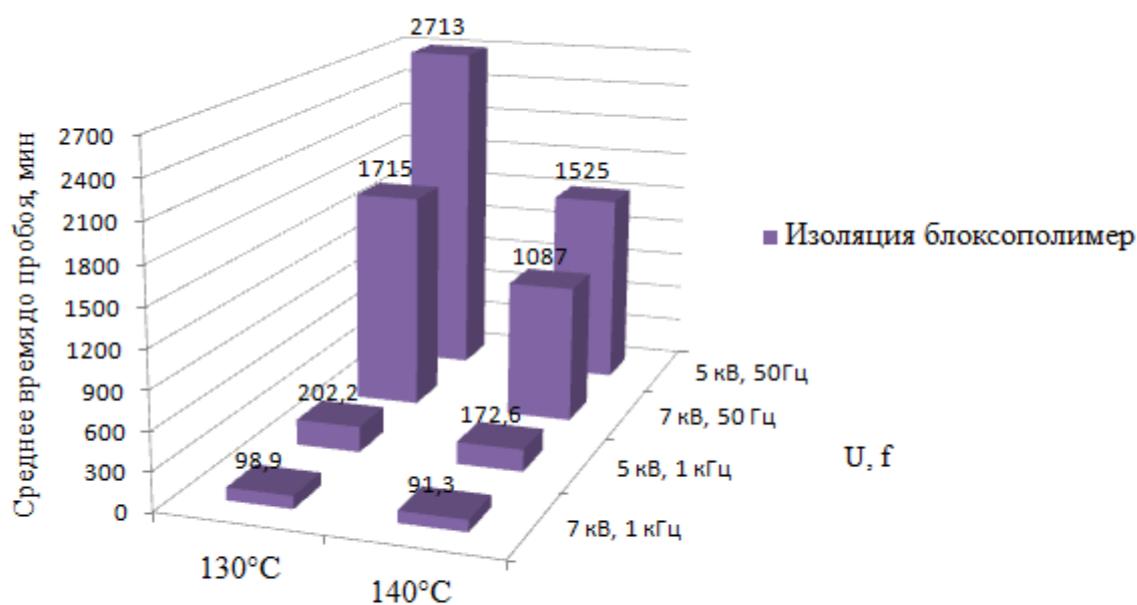
Т°С/ U _{исп} , кВ	Среднее время до пробоя, мин
Старение на переменном напряжении частотой 50Гц	
140/7	1087
130/7	1715
140/5	1525
130/5	2713

Таблица 8 –Результаты испытаний макетных образцов с изоляцией из полиуретана

Т°С/ U _{исп} , кВ	№ образцов	Время до пробоя, мин	Среднее время до пробоя, мин
Старение при высокочастотных электрических нагрузках			
120/7	1	694	782,6
	2	709	
	3	900	
	4	733	
	5	776	
	6	781	
	7	885	
130/7	1	467	541,7
	2	477	
	3	522	
	4	526	
	5	542	
	6	420	
	7	496	
	8	572	
	9	545	
	10	548	
	11	604	
	12	778	

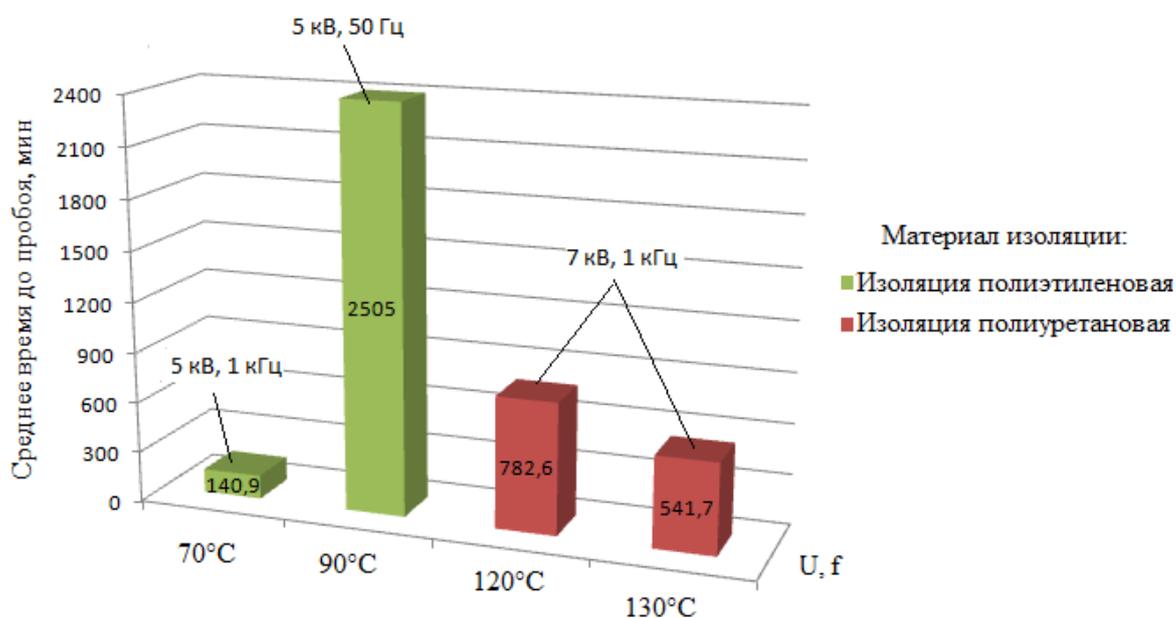
Таблица 9 – Результаты испытаний макетных образцов с изоляцией из полиэтилена

Т°С/ U _{исп} , кВ	№ образцов	Время до пробоя, мин	Среднее время до пробоя, мин
При переменном напряжении частотой 50Гц			
90/5	1	80	Более 2505
	2	81	
	3	183	
	4	214	
	5	224	
	6	273	
	7	Более 5300	
При высокочастотных электрических нагрузках			
70/5	1	123	140,9
	2	128	
	3	131	
	4	136	
	5	142	
	6	119	
	7	121	
	8	125	
	9	126	
	10	127	
70/5	11	103	140,9
	12	130	
	13	134	
	14	216	
	15	135	
	16	145	
	17	152	
	18	169	
	19	174	
	20	182	



Температура старения образцов

Рисунок 16 – Результаты определения среднего времени до пробоа изоляции макетных образцов



Температура старения образцов

Рисунок 17 – Результаты определения среднего времени до пробоа изоляции макетных образцов

3.3 Обсуждение результатов

Можно сделать общие выводы по результатам испытаний:

В эксплуатации на изоляцию кабельных изделий воздействуют, тепловые, электрические, механические и другие нагрузки. Многочисленными исследованиями установлено, что для изоляции низковольтных кабелей основной нагрузкой, приводящей к старению, является действие температуры (тепловое старение изоляции), как показали результаты испытаний повышение частоты воздействующего электрического напряжения (характерные для периода эксплуатации ЧРП на базе ШИМ) резко ускоряет процессы старения и отказа изоляции.

При повышении температуры и напряженности электрического поля резко снижается среднее время до пробоя изоляции.

1. Это объясняется ускорением процесса теплового старения в электроизоляционных материалах при протекании ряд процессов, изменяющих их свойства. Эти процессы определяются, прежде всего, химическим составом и условиями работы изоляции в тепловом поле, могут быть весьма различными. Прежде всего, при сохранении высокой механической прочности, неизменности геометрических размеров и формы изделия и т.п. электроизоляционные свойства материала могут ухудшаться настолько, что это само по себе ограничит допустимую рабочую температуру материала. У твердых электроизоляционных материалов при нагревании наблюдается расплавление или резкое снижение механической прочности, процессы окисления (при доступе кислорода, у органических веществ), а также наряду с повторяющимися тепловыми расширениями и сокращениями – при циклических изменениях температуры приводит к образованию трещин. В ряде случаев вместо полимеризации при нагревании, наоборот, может проявляться термическая деструкция полимерных молекул, что также неблагоприятно сказывается на механических свойствах материала. Эти процессы необратимые [22].

Скорость протекания этих процессов определяется зависимостью температурного воздействия на скорость химических реакций описана известным законом Аррениуса [23]:

$$K_t = K \cdot e^{-W_a/(kT)} \quad (3)$$

где K_t – средняя вероятность распада одной молекулы в единицу времени, определяющая скорость химических реакций; K – постоянная, зависящая от структуры вещества, вступающих в реакцию; W_a – энергия активации; k – постоянная Больцмана.

В настоящее время при эксплуатации низковольтных кабельных изделий в составе ЧРП по причине действия высоких электрических напряжений изменился механизм старения изоляции, стал преобладать электротепловой характер.

2. В процессе эксплуатации, изоляция питающих кабелей длительное время находится под рабочим напряжением или периодически испытывает воздействие повышенных напряжений. Во время испытаний заметно влияет электрическое поле на изоляцию образца. Электрическое старение происходит весьма медленно в доброкачественной изоляции, достаточно плотной и монолитной. Старение постепенно ускоряется по мере развития общего разрушения, воздействующими различными нагрузками (тепловые, механические, электрические и др.), сопровождающегося разрыхлением и расслоением изоляции, образованием в ней пор, пустот (газовых или воздушных прослоек), трещин. Различные микродефекты есть в той или иной степени в изоляции, но по мере её старения их размеры и количество существенно увеличиваются. С появлением таких неоднородностей развиваются ионизационные процессы и воздействие ч.р. на изоляцию. Разрушающее действие ч.р. является результатом теплового воздействия, бомбардировки заряженными частицами (в основном электронами), воздействия химических активных продуктов, образовавшихся

в процессе развития ч.р., а также ударных волн и излучения. Действие этих факторов вызывает электрическую эрозию, а также происходят структурные изменения (деструкция). Эрозия может быть обусловлена следующими причинами:

- окислением полимеров высокореактивными радикалами, существующими только в зоне действия разряда;
- реакциями макрорадикалов полимера, образовавшимися под действием разрядов, с активными веществами, возникающими в результате ч.р.;
- бомбардировкой поверхности диэлектрика электронами и ионами.

Иногда эрозию связывают с процессами нагрева поверхности диэлектрика в местах соприкосновения с каналами отдельных ч.р. и последующего испарения диэлектрика. Эрозия и разрушение диэлектрика могут происходить за счет электронной бомбардировки его поверхности, так как значительная часть энергии разряда переносится электронами.

Структура изоляции изменяется при непосредственном воздействии разрядов на диэлектрик (электронно-ионная бомбардировка, ультрафиолетовое облучение), а также и вследствие воздействия газообразных и других продуктов, возникших в результате разряда (озон, окислы азота, атомарный кислород, хлор, хлористый водород, соляная и другие кислоты). Структурные изменения материала диэлектрика проявляются в изменении инфракрасных спектров, молекулярной массы, увеличении $\text{tg}\delta$, изменение диэлектрической проницаемости и удельного объемного сопротивления [24].

Частичные разряды иногда приводят к так называемым незавершённым пробоям, когда пробивается лишь часть слоев. С течением времени разряды становятся чаще, а напряжение их возникновения - меньше. Этот процесс завершается полным пробоем. Кроме разрядов в толщине изоляции при определённых условиях возникают также поверхностные

разряды (коронные разряды), которые сопровождаются разрушением внешних слоев изоляции.

3. Совместное действие температуры и электрического поля на изоляцию низковольтных питающих кабелей значительно ускоряют процессы старения изоляции.

Повышение уровня воздействующего электрического напряжения сильнее сказывается на снижении среднего времени до пробоя изоляции, чем при повышении температуры, т.е. интенсивность электрического старения, преобладает над тепловым, которое ускоряют процессы разрушения изоляции.

Повышение частоты приложенного поля резко снижает среднее время до пробоя, это связано с тем, что повышается неоднородность поля, возникают разряды, которые также ускоряют процессы электротеплового старения.

4. Среди исследуемых материалов изоляция из блоксополимер этилен-пропилена показал лучшую стойкость к электротепловым нагрузкам и в тоже время повышение частоты в несколько раз снижает среднее время до пробоя изоляции образцов.

5. Хорошей короностойкостью обладает полиэтилен, но его широкое применение ограничено в низкой рабочей температуре (до 70°C). Что касается стойкости полиуретана необходимо проведение дополнительных исследований, которые будут продолжены в будущем.

6. Подобные испытания позволяют адекватно оценить стойкость изоляции кабельных изделий к электротепловым нагрузкам и выбрать материалы для изоляции питающих кабелей ЧРП.

Заключение

При выполнении магистерской диссертации проведен литературный обзор, в котором были рассмотрены особенности применения кабельных изделий для питания электрических машин от преобразователя частоты. А также были изучены специальные кабели и электроизоляционные материалы, применяющие в системе ЧРП. Сделан обзор существующих методов определения стойкости кабельных изделий к электротепловым нагрузкам, сформулированные выводы и поставленные задачи на исследования.

В методической части работы приведена информация о конструкции макетных образцов, а также описана методика определения среднего времени до пробоя изоляции кабельных изделий под действием электротепловых нагрузок.

Экспериментальная часть работы содержит результаты определения среднего времени до пробоя изоляции в процессе электротеплового старения (изоляция из блоксополимер этилен-пропилена, полиэтилена и полиуретана). Испытания показали, что повышение уровня воздействующего электрического напряжения сильнее сказывается на снижении среднего времени до пробоя изоляции, чем при повышении температуры. А повышение частоты является основной причиной снижения среднего времени до пробоя изоляции, коронных разрядов становится больше и происходит ускорение процессов электротеплового старения и износ изоляции. Поэтому рекомендуется применять в системе ЧРП защитные фильтры и применение специальных кабелей, устойчивых к электрическим нагрузкам при частотном управлении.

Так же рассмотрены вопросы техники безопасности при работе с электрооборудованием, проанализированные вредные и опасные факторы, влияющие на здоровья человека; рассмотрены меры коллективной и индивидуальной защиты. Помимо этого, определены цели проекта, стоимость материальных ресурсов и построены графические материалы.

Introduction

The research is vital, because in the operation of variable frequency drive (VFD) there are negative factors due to the influence of high voltage components such as: overvoltage at motor terminals, electromagnetic interferences which affect the drive elements: cable, motor, transformer, and so on. d. All this reduces the reliability of the drive and the service life of power supply cables and leads to accidents.

The aim of the present work is a comparative assessment of polymeric insulation to the electro-thermal loads which is typical for the VFD system.

The objectives of the present work are:

- to study the nature and magnitude of the electrical surge in the supply cables VFD.

- to work out the methodology of the experiment for evaluating the insulation resistance of power cables in the system VFD to action of electric loads.

- to carry out comparative tests on the insulation resistance of cable products samples to electro-thermal loads.

- to develop recommendations for the use of materials for insulating power cables according to the operating characteristics of systems in the VFD.

The research objects are: model sample insulated blocks: copolymer ethylene-propylene, polyethylene (PE) and polyurethane.

The research methods are physical testing prototypes for resistance to electro-thermal loads.

The scientific novelty of the present work is to develop a criterion insulation resistance evaluation of the supply cables to the electro-thermal load characteristic of the VFD.

The practical value of the present work is to develop recommendations on the testing of electrical insulating materials and their use as insulation power cables on the basis of the PWM VFD.

Structure and volume of the work

Our work has of 90 pages and consists of introduction, five basic units, conclusion and appendices. Each unit consists of several logically interconnected chapters followed by a conclusion where we enumerate the results of our work concerning that unit. The total outcome of the research is summarized in a separate conclusion. Our references consist of 39 sources represented by books of Russian and foreign authors.

1. Electric voltage VFD elements

VFD – is the control system of the motor rotor speed. It consists of a frequency converter, the power supply cable and the motor (figure 1 shows a simple representation of a system VFD).

Basically, modern frequency converters built on the double conversion scheme. The frequency converter consists of a rectifier, filter capacitor, inductor, a stand-alone inverter, PWM control system and automatic control system.

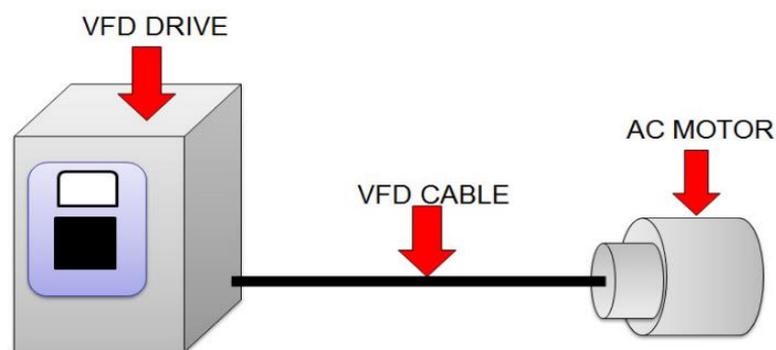


Figure 1– The chart of the system of variable frequency drive

The advantages of this system are: high precision control, electricity savings in the case of variable load, the stabilization of the rotation speed when the load changes, the smooth start of the engine, significantly reducing wear and increased equipment life, and more.

Despite all the positive aspects of the use of frequency control system based on pulse-width modulation (PWM) are accompanied by a significant number of shortcomings: the harmonic distortion of the main supplies, electromagnetic interference and power surges, arising from reflections.

The output of the variable frequency drive provides a pulse-modulated rectangular voltage pulses produced by a super-fast semiconductor switches (IGBT). These pulses create a wide range of high-frequency noise, resulting in

heavy wear on the insulated copper wire windings and the motor supply cables, and this can lead to deterioration of the insulating layer.

High operating frequency and extremely fast voltage switching impose additional requirements on the length of the connecting cable. The voltage pulses generated by the VFD are applied to the motor terminals of the reflected waves. Reflected waves from the ends of the cable can lead to a twofold increase in the output voltage of the drive. Lacquered insulation of the motor windings is not designed for such surges can therefore occur insulation breakdown [1].

Similar processes negatively affect the electrical insulation. All this leads to a sharp reduction in the service life of the power cable and the insulation of the winding.

2. Special cables for use in VFD System

Recently, special cables for variable frequency drives with a pulse-width modulation are developed and produced by the leading international cable companies (LAPPKABEL, Alpha Wire, HELUKABEL, LUTZE, Draka, Belden and the others) [2, 3, 4,].

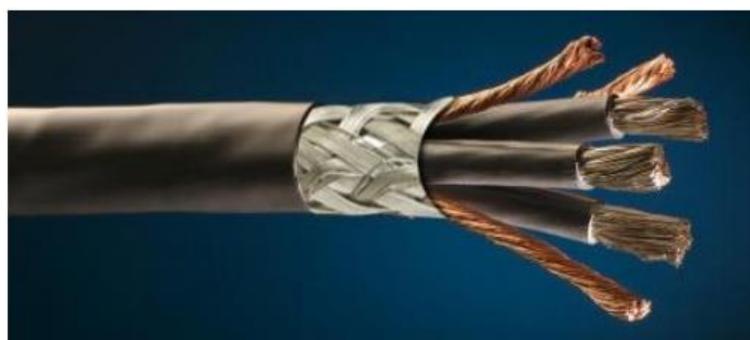


Figure 2 – The modern design of foreign manufacturers of cables «VFD-cables»

Cable used to connect the VFD drive to the motor affect how well the VFD system handles the phenomena with potential to disrupt operations. Cables designed specifically for VFD applications withstand these phenomena. And,

equally important, they do nothing to make the situation worse. A generic motor supply cable is not designed with the specific requirements of VFD system in mind actually cause problems.

The design features of these cables:

- The insulation must have excellent dielectric properties to prevent breakdown from the stresses of voltage and current spike, corona discharges, and so forth. Cross-linked polyethylene (XLPE) has the required properties, making it a better choice than standard polyethylene or PVC. XLPE insulation helps reduce the potential effects of harmonics and corona discharge, therefore providing stable electrical performance which prolongs the life of the cable. This reduces the need for costly downtime due to cable failure

- Foil shielding uses a thin layer of aluminum, typically laminated to a substrate such as polyester to add strength and ruggedness. It provides 100% coverage of the conductors it surrounds, which is good. It is thin, which helps keep cable diameters small, but is it harder to work with, especially when applying a connector.

A woven braid provides a low-resistance path to ground and is much easier to termination by crimping or soldering when attaching a connector. Depending on the tightness of the weave, braids typically provide between 70% and 95% coverage. Because copper has higher conductivity than aluminum and the braid has more bulk for conducting noise, the braid is more effective as a shield. But it adds size and cost to the cable.

The following approach combines both foil and braid shields in protecting the cable. Each supports the other, overcoming the limitations of one with its own compensating strengths. As shown in figure 2, this presents shielding effectiveness superior to either approach alone.

- A round, symmetrical cable gives the best electrical performance and resistance to deleterious effects. One reason is that round symmetry creates more uniform electrical characteristics in the cable. The electrical characteristic of one conductor doesn't differ significantly from another. For example, having the

ground wires placed symmetrically around the cable provides a more balanced grounding system [5].

To date, the only Russian master release nomenclature cable products adapted for the VFD system. For example, power cables trademarks TOFLEKS (production of "Tomskcable" Tomsk).



Figure 3 – Cable brand TOFLEKS EMC PvEaElVng (A)

A detailed description of the construction of the cable TOFLEKS EMC is shown in the example of the brand PvEaElVng (A) (structure shown in figure 3). Conductor made of copper, stranded circular shape corresponds to class 5 flexibility as per GOST 22483. As the main conductor insulation and lived ground cross-linked polyethylene is used. Stranding basic insulated conductors are twisted to form a core with the cores and ground core, or shielded pairs of control wires (if available). Screen - a combined total of alumopolymer tapes or flexible materials based on aluminum foil and a braid of tinned copper wires. Outer sheath - PVC reduced combustibility [6].

3. Design patterns: twisting of the insulated model sample

Sample preparation is carried out by cutting sections of wires and their further twist to reach the working length equal portion (125 ± 5). Twisting is

performed on special equipment, the relevant technical documentation. The circuit device is shown in figure 4.

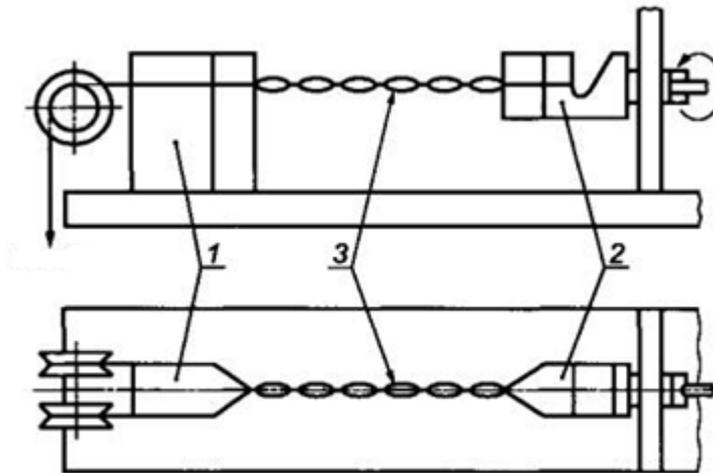


Figure 4 – Device for twisting samples

1 – fixed brace; 2-rotating hook-strut; 3 – sample.

The number of twists depending on the diameter of the wire should be as shown in table 1. After twisting the wire loop on the end of the sample should be cut and moved apart from the opposite side of the sample at both ends of the insulation must be removed [7].



Figure 5 -Test samples in the oven

Table 1 – Dependence of the number of twists on the diameter of the wire

Nominal diameter of wire, mm	The number of twists per length of 125 mm
0,355-0,5	16
0,5-0,71	12
0,71-1,06	8
1,06-1,4	6
1,4-2,0	4

4. The methodology of the experiments

Tests conducted on a laboratory bench-emitting load that occur in a VFD system based on PWM. Test samples are placed in an oven heated to a certain temperature (depending on the insulation material) and then the AC voltage is applied. Samples tested voltage: industrial and high frequency with an amplitude of 1200 V, a frequency of 400 Hz frequency (modulation) 5 kHz voltage quantization (the length of the wave front) steepness of the leading edge 4 microseconds. In tests must be clearly visible blue glow lay on the surface. Next the mean time to breakdown of insulation samples.

5. Definition of mean time to breakdown of the insulation in the process of electro-thermal aging

In accordance with the procedure were prepared model samples for testing, and it was definitely the mean time to breakdown of the insulation prototypes. Tests were carried out on the electrical system.

To carry out tests on prototypes of AC voltage of high frequency electronic control unit used to generate high frequency voltage. Samples were tested at 5 and 7 voltage kV at a frequency of 1 kHz (ZASI-30); Test temperature 120, 130 and 140°C.

To determine the mean time to breakdown of the insulation of the block copolymer, ethylene-propylene at high frequencies for electric loads is taken for

the result of the arithmetic average of at least 10 samples at a voltage of 5 kV and 7; Test temperature 130 and 140°C; at industrial frequency of 50 Hz and a high frequency of 1 kHz.

To determine the mean time to breakdown of the insulation of polyurethane at high frequencies for each batch is tested at least 10 samples of the applied voltage of 7 kV; Test temperature 120 and 130°C; at a high frequency of 1 kHz.

To determine the mean time to breakdown of the insulation from polyethylene for each batch was tested at least 10 samples of the applied voltage of 5 kV; test temperature 70 and 90°C; at industrial frequency of 50 Hz and a high frequency of 1 kHz.

The test results are shown in table 2, in figure 6 and 7.

Table 2 – Test Results prototypes

Aging at high electrical loads (1kHz)				
Blockcopolymer insulation				
Testingvoltage, kV	5 kV		7kV	
Test temperature, °C	130	140	130	140
The mean time to breakdown, minutes	172,6	202,2	98,9	91,3
Polyurethane insulation				
Testingvoltage, kV	7kV			
Test temperature, °C	120		130	
The mean time to breakdown, minutes	782,6		541,7	
Polyethylene insulation				
Testingvoltage, kV	5 kV			
Test temperature, °C	70			
The mean time to breakdown, minutes	140,9			
Aging with AC voltage of 50 Hz				
Testingvoltage, kV	5 kV			
Test temperature, °C	90			
The mean time to breakdown, minutes	2505			

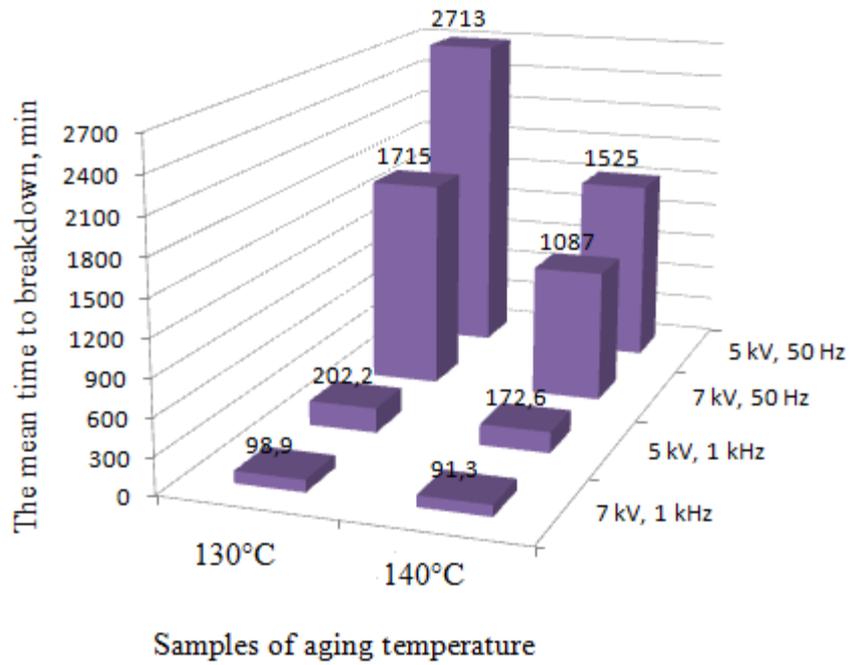


Figure 6 – The results of the mean time to breakdown of the insulation prototypes (blockcopolymer insulation)

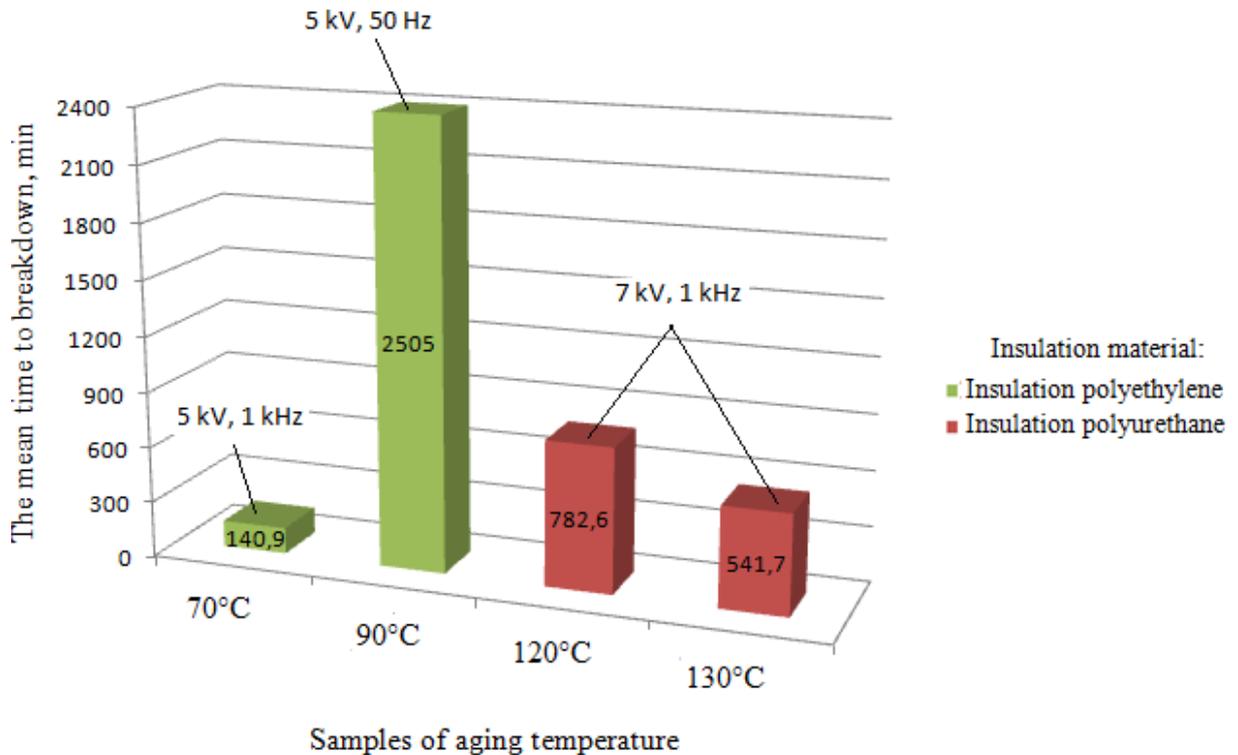


Figure 7– The results of the mean time to breakdown of the insulation prototypes

Conclusion

From the outcome of our investigation it is possible to conclude that with the increase in temperature and the electric field strength the mean time to breakdown of the insulation is sharply reduced.

1. Increasing the frequency of the applied field sharply reduces the mean time to breakdown, due to the fact that heterogeneity of the field is increased, discharges which accelerate the process of electro-thermal aging are generated.

2. Block copolymer ethylene-propylene isolation showed the best heat-resistant to electro-thermal stresses among insulation materials being investigated.

At the same time if the frequency is increased in several times, the mean time to breakdown of insulation samples is reduced.

3. The polyethylene has good corona-resistance, but it's wide use is limited to low operating temperature (70°C). As for polyurethane resistance it is necessary to conduct additional studies that extend far into the future.

4. Such tests allow to estimate the insulation resistance of cable products to the electro-thermal load adequately and select materials for the insulation of supply cables VFD.