

Запорожский национальный технический университет

На правах рукописи

Немыкина Ольга Владимировна

УДК 621. 316.12:621.314.58

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ
ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КРАНОВ С ЧАСТОТНО-
РЕГУЛИРУЕМЫМ ПРИВОДОМ**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Андриенко Петр Дмитриевич

Запорожье - 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1 Анализ состояния разработок, принципов построения систем электропитания кранов и постановка задач исследования.....	11
1.1 Системы электропитания кранов.....	11
1.1.1 Анализ системы электропитания кранов переменного тока.....	15
1.1.2 Анализ системы электропитания кранов постоянного тока.....	26
1.2 Методы и постановка задач исследования.....	29
2 Сравнительная оценка систем электропитания кранов с частотно-регулируемым приводом.....	32
2.1 Схемы замещения систем электропитания кранов	33
2.2 Оценка расчетных мощностей систем электропитания кранов	39
2.3 Оценка сечений шин и троллейных линий по условию нагрева.....	44
2.4 Оценка потери напряжения в шинах и троллейных линиях.....	48
2.5 Оценка потерь мощности в шинах и троллейных линиях	59
2.6 Сравнительная оценка систем электропитания кранов.....	62
Выводы	64
3 Исследование электромагнитных процессов в системе электропитания кранов с частотно-регулируемым приводом	66
3.1 Особенности электромагнитных процессов активного выпрямителя с двухсторонней проводимостью.....	66
3.2 Исследование электромагнитных процессов в системе электропитания кранов переменного тока.....	78

3.3 Особенности электромагнитных процессов в системе электропитания кранов постоянного тока.....	91
Выводы.....	94
4. Разработка рекомендаций по повышению эффективности систем электропитания кранов с частотно-регулируемым приводом.....	97
4.1 Методология выбора системы питания кранов с частотно-регулируемым приводом	97
4.2 Рекомендации по повышению эффективности системы электропитания кранов переменного тока.....	101
4.3 Рекомендации по повышению эффективности системы электропитания кранов постоянного тока.....	104
Выводы.....	108
Заключение.....	110
Список использованной литературы.....	112
Приложение А – Параметры системы электропитания кранов переменного тока.....	129
Приложение Б – Параметры системы электропитания кранов постоянного тока	132
Приложение В – Численные значения параметров сечений шин и троллейных линий.....	136
Приложение Г – Зависимости потери напряжения в шинах и троллейных линиях	139
Приложение Д – Зависимости сечения шин и троллейных линий в функции граничной длины по условию потери напряжения.....	142
Приложение Е – Акт испытания.....	145
Приложение Ж – Акты внедрения.....	146

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АВ – активный выпрямитель

АД – асинхронный двигатель

АИН-ШИМ – автономный инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией

ВР – выпрямительный режим

НН – низкое напряжение

ПВ – продолжительность включения

ПКР – повторно-кратковременный режим

ПКЭ – показатели качества электроэнергии

ПЧ – преобразователь частоты

РП – режим потребления

РР – режим рекуперации

РУ – распределительное устройство

СЭК – система электропитания кранов

ФКУ – фильтро-компенсирующее устройство

ХХ – холостой ход

ЧРП – частотно-регулируемый привод

ЭМС – электромагнитная совместимость

IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor (биполярный транзистор с изолированным затвором)

Актуальность темы.

В связи с непрерывным подорожанием электроэнергии в Украине и за рубежом уделяется большое внимание энергосбережению в электрических сетях.

Современные подъемно-транспортные средства выполняют до 70 % грузовых работ и имеют тенденцию к использованию частотно-регулируемого электропривода (ЧРП) на базе двухзвенного преобразователя частоты, который качественно меняет работу систем питания за счет наличия в токопроводах высших гармонических составляющих тока и напряжения. Звено постоянного тока образуют выпрямители, как правило, групповые, питающие ряд инверторов по числу механизмов на кранах.

Внедрение частотно-регулируемого электропривода на кранах осуществляется путем модернизации кранов или закупкой новых, которые питаются от существующих систем. Существующие системы электропитания кранов используют в основном системы релейно-контакторного управления с двигателями переменного или постоянного тока, имеющими ряд известных недостатков [3, 82].

В пуско-тормозных режимах кранов возникают большие потери энергии в пусковых реостатах. Доля потерь с учетом пуско-тормозных режимов достигает 15% от общего расхода электрической энергии при работе крана, из них до 30% приходится на потери в системах питания, реализованных шинами или троллейными линиями [95].

Современная тенденция использования частотно-регулируемых приводов решает проблему создания высокоэффективных систем электроприводов кранов, однако такие системы имеют высокую стоимость, что требует их корректного использования для уменьшения их срока окупаемости. Весомый вклад в решение проблемы разработки, исследованию и внедрению частотно-регулируемых электроприводов для кранов принадлежит отечественным ученым Андриенко П.Д., Волкову А.В., Волкову И. В., Чехету Э. М., и многим другим исследователям разных стран и поколений.

Однако, несмотря на значительное количество научных работ, выбор системы электропитания кранов с частотно-регулируемым электроприводом требует подробного обоснования и определяется режимами работы кранов с учетом особенностей преобразователей частоты.

Наличие на входе преобразователей частоты выпрямителя или активного выпрямителя с возможностью рекуперации энергии в сеть вызывает потребность пересмотра концепции построения системы электропитания кранов с частотно-регулируемым приводом. Место нахождения указанных выпрямителей – на кране или в распределительном устройстве 0,4 кВ – определяет напряжение систем электропитания кранов – переменное или постоянное.

Вопрос пересмотра концепции построения систем питания кранов с частотно-регулируемым приводом на основе двухзвенных преобразователей частоты и разработка метода сравнительной оценки систем питания кранов постоянного и переменного тока для создания эффективных систем питания кранов является актуальной и востребованной практикой задачей.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Основные результаты диссертационной работы получены автором в процессе выполнения госбюджетной научно-исследовательской работы Запорожского национального технического университета по теме ДБ №01719 от 01.09.2009 «Разработка методов оптимизации систем электропитания с полупроводниковыми преобразователями и электротехнологическими установками» (номер госрегистрации 019U007668) и связаны с планами научно-хозяйственной деятельности ООО «НИИ «Преобразователь» по созданию преобразователей и электроприводов для крановых установок.

Цель и задачи исследования.

Целью диссертационной работы является обоснование выбора рациональной системы питания кранов, оснащенных частотно-регулируемым приводом с двухзвенными преобразователями частоты, на основе сравнительной оценки систем питания кранов постоянного или переменного

тока по критериям материальных затрат и потерь мощности, а также разработка рекомендаций по повышению эффективности систем электропитания крановых установок при обеспечении показателей качества электроэнергии и электромагнитной совместимости.

Для достижения поставленной цели решались такие основные задачи:

- анализ состояния разработок и принципов проектирования систем электропитания кранов;
- разработка метода сравнительной оценки эффективности систем электропитания кранов переменного и постоянного тока, оснащенных частотно-регулируемым электроприводом с двухзвенными преобразователями частоты, по критериям: расчетной мощности, допустимых потерь напряжения и потерь мощности в токопроводах;
- разработка математической модели системы электропитания кранов с частотно-регулируемым электроприводом на основе активного выпрямителя с двухсторонней проводимостью;
- исследование электромагнитных процессов в системе питания кранов переменного или постоянного тока, оснащенных частотно-регулируемым электроприводом на основе активного выпрямителя с двухсторонней проводимостью;
- обоснование рекомендаций для повышения эффективности проектируемых и модернизации существующих систем питания кранов с частотно-регулируемым приводом на основе двухзвенных преобразователей частоты.

Объект исследования – электромагнитные процессы в системах питания кранов с частотно-регулируемым приводом.

Предмет исследования – критерии оценки эффективности систем питания кранов с частотно-регулируемым приводом при обеспечении показателей качества электроэнергии и электромагнитной совместимости.

Методы исследования.

Решение поставленных задач в диссертационной работе выполнено с

использованием методов: расчета электрических цепей и расчета электрических нагрузок в системах электроснабжения. Имитационное моделирование выполнено для исследования электромагнитных процессов в системах питания кранов. Экспериментальное исследование использовано для проверки достоверности разработанной модели и полученных результатов.

Научная новизна полученных результатов заключается в том, что:

1) получил дальнейшее развитие метод выбора системы питания кранов с частотно-регулируемым электроприводом, предусматривающий анализ систем питания на постоянном или переменном токах, который в отличие от существующих использует аналитические соотношения относительных значений расчетных мощностей, сечений токопроводов, потери напряжения и мощности в токопроводах, что позволяет при сравнительной оценке определить относительное значение материальных затрат и потерь мощности в системах электропитания кранов;

2) доказано, с помощью математической модели системы электропитания кранов, что наличие высокочастотных гармонических составляющих фазного тока приводит к увеличению потерь мощности до 2 раз в токопроводах, реализованных троллейными линиями и потери напряжения до 2,6 раза в токопроводах, реализованных шинами, по сравнению с результатами, полученными для синусоидального тока, что вызывает необходимость проверочных расчетов троллейных линий и шин;

3) впервые методом математического моделирования установлено, что в активном выпрямителе с двухсторонней проводимостью при управлении транзисторами импульсами длительностью 120° , которые синхронизированы с работой соответствующих им диодов, в режимах холостого хода и малых нагрузок ($0-0,3$) $I_{ном}$ в фазном токе возникают высокочастотные составляющие с гармониками 5, 7 и выше, которые ухудшают значение коэффициента общего гармонического искажения тока THD_I до 200 % и более.

Практическая ценность полученных результатов заключается в том, что:

1. Результаты диссертационной работы использованы в ОАО «НИИ Преобразователь» при модернизации выпрямителей с рекуперацией энергии типа ВР – ТППТ – 300 – 0,4 для группового питания автономных инверторов напряжения и для электропривода согласованного вращения механизма перемещения крана с рекуперацией энергии типа МПЧ - ТТП - 160 - 380 - 50 УХЛ 4.

2. Метод сравнительной оценки систем электропитания кранов с частотно-регулируемыми приводами принят к внедрению в ГП «ГИПРОПРОМ» (г. Запорожье).

3. Рекомендации по повышению эффективности систем электропитания кранов приняты к использованию в ОАО «Запорожсталь» (г. Запорожье) при модернизации кранов в цехе горячей прокатки.

4. При выполнении анализа систем электропитания кранов доказано, что наиболее рациональным является вариант системы электропитания на постоянном токе, который по сравнению с системой электропитания переменного тока имеет преимущества по всем оцениваемым критериями:

- снижение расчетной мощности трансформатора до 43 % при коэффициенте использования $k_{исп} = 0,2$ и до 23 % при $k_{исп} = 0,5$ позволяет снизить номинальную мощность силовых трансформаторов или их загрузку при сохранении номинальной мощности, а также уменьшить сечения токопроводов систем питания постоянного тока по сравнению с переменным током;

- уменьшение сечений токопроводов по условию допустимой потери напряжения при использовании напряжения 600 В в системе питания постоянного тока по сравнению с системой питания переменного тока напряжением 380 В. При коэффициенте мощности $\cos \varphi = 1$ уменьшение

сечений происходит в диапазоне $61 \div 66 \%$ для троллейных линий и $41 \div 59 \%$ - для шин в зависимости от используемого сечения токопроводов;

- уменьшение удельных потерь мощности в токопроводах при $\cos \varphi = 1$, происходит до 74% для троллейных линий, и до 65% - для шин.

Апробация результатов диссертации.

Основные положения диссертации докладывались, обсуждались на международных научно-технических конференциях молодых ученых и специалистов «Электромеханические системы, методы моделирования и оптимизации» (г. Кременчуг, 2010 г., 2011 г.); международных научно-технических конференциях «Проблемы автоматизированного электропривода» (пгт. Николаевка, АР Крым, 2007 г.; г. Алушта, АР Крым, 2009 г.; п. Кипарисное, АР Крым, 2010 г.; г. Одесса, 2011 г. 2014 г.); международной научно-практической интернет-конференции «Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте '2013» (2013 г.); научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава, сотрудников и студентов ЗНТУ, г. Запорожье, 2008÷2014 г.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, среди которых 8 статей в научно-профессиональных изданиях Украины, в том числе 4 статьи в изданиях, которые включены в международные научно-метрические базы. Без соавторов опубликовано 4 статьи.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованной литературы (135 наименований) и 7 приложений. Основное содержание изложено на 110 страницах печатного текста, содержит 43 рисунка и 17 таблиц. Общий объем диссертации - 148 страниц.

1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ РАЗРАБОТОК, ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КРАНОВ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Системы электропитания кранов

Для питания крановых установок в настоящее время используют системы питания с переменным и постоянным током.

подавляющая часть электрической энергии для крановых установок (грейферных, мостовых, порталных) передается от источника к нагрузке с помощью трехфазных симметричных систем синусоидального напряжения, а малая часть – до 7 % (для металлургического производства) – с помощью систем электропитания постоянного напряжения [33].

Существующие механизмы подъема кранов, как правило, оснащены электроприводами на базе трехфазных асинхронных двигателей с фазным ротором и релейно-контактным управлением (мостовые, козловые, порталные краны) или тиристорными приводами постоянного тока с двигателями кранового исполнения (грейферные, мостовые краны фирмы «KONE») [73, 75]. Тенденция применения частотно-регулируемых приводов (ЧРП) направлена на повышение эффективности работы кранов за счет снижения динамических усилий в их металлоконструкциях и износа отдельных узлов механизмов [12], а также снижение потерь в пуско-тормозных режимах электрооборудования кранов и при понижении частоты вращения асинхронного двигателя (АД) [8, 81].

Опыт работы показывает, что применение ЧРП для крановых установок целесообразно при их использовании с максимальной загрузкой, которая характерна для кранов с продолжительностью включения (ПВ) $\geq 40 \%$ и коэффициентом использования ($k_{исп}$) $k_{исп} = 0,2 \div 0,5$.

Увеличивающийся объем внедрения силовой электроники в систему регулирования и управления кранового оборудования вызывает

необходимость в дополнительном рассмотрении концепции построения системы электропитания кранов (СЭК).

Модернизация электрооборудования группы кранов, которые питаются от общих шин переменного или постоянного тока производится в комплексе с учетом конструкции и параметров уже существующей СЭК.

В настоящее время широкое применение получила так называемая АС – DC – АС система построения силовой части ЧРП, содержащая три основных блока: выпрямитель на входе, инвертор на полностью управляемых ключах на выходе и фильтр между ними (батарею конденсаторов). Количество выпрямителей (k) и инверторов (m) может принимать произвольные значения: $k = m$, либо $k > m$, или $k < m$ [19, 42, 92]. Более широкое распространение получило схемное решение при $k < m$, а именно с одним общим входным выпрямителем ($k = 1$), обобщенная структурная схема СЭК представлена на рисунке 1.1 [43, 44, 54, 74].

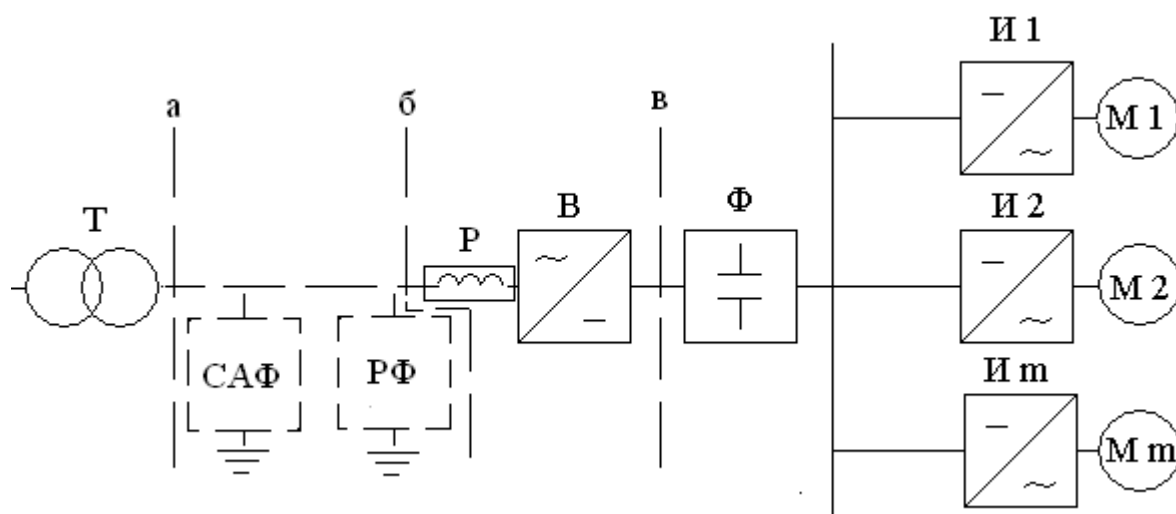


Рисунок 1.1 – Структурная схема СЭК

В общем случае входной выпрямитель (В) питается от трехфазной системы переменного тока, выход которого образует так называемую шину постоянного тока. После фильтра (Ф) напряжение подается на m инверторов (И) для управления m модернизируемых двигателей крана. В качестве

инвертора используется автономный инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией (АИН-ШИМ), который позволяет обеспечить пусковой режим работы в широком диапазоне скоростей и рабочих нагрузок для кранового электропривода [81, 83].

При общепринятом принципиальном подходе к преобразованию электрической энергии конструктивное построение систем электропитания кранов существенно влияет на способы реализации этой системы с точки зрения обеспечения показателей качества электроэнергии (ПКЭ) и электромагнитной совместимости (ЭМС) с питающей сетью. Это различие заключается в двух способах подвода электроэнергии к крановой установке.

1) питание установки переменным трехфазным током (рисунок 1.1 линия а, б) соответственно с группой входных выпрямителей по схеме $k < m$, причем $k = n$ (для n кранов) возможно двумя способами. Размещение устройств обеспечивающих ПКЭ и ЭМС на крановой установке (рисунок 1.1 линия а) или вне крановой установки (рисунок 1.1 линия б). К фильтрующим устройствам (ФУ) относятся: линейные реакторы (Р), силовые активные фильтры (САФ), широкополосные УНФ фильтры, резонансные фильтры (РФ), настроенные на определенный порядок гармоник. Как правило, резонансные фильтры настроены на 5 и 7 гармоники для трехфазных мостовых схем. Возможно применение как индивидуальных ФУ на крановой установке (морской порт «Южный», Одесская область) [13], так и групповых ФУ (универсальный перегрузочный комплекс г. Севастополь).

2) питание крановой установки постоянным током (рисунок 1.1 линия в) с установкой общего выпрямителя на распределительном устройстве (РУ) трансформатора для группы кранов по схеме $k < m$, причем $k = 1$.

Расположение входных выпрямителей для n – кранов системы питания определяет вид напряжения: переменный или постоянный.

С точки зрения преобразования электрической энергии для двух исполнений сети электромагнитные процессы, вызывающие тепловые потери и искажения токов и напряжений в процессе преобразования, имеют

одинаковую природу, и для их исследования применяется общепринятая методика. Однако конструктивное отличие выполнения сети имеет ряд особенностей в протекании электромагнитных процессов и вызывает различный подход к техническим решениям, обеспечивающим эффективность СЭК.

СЭК, питающаяся от трансформаторной подстанции, обычно выполняют шинопроводом или шинами открытого исполнения, либо троллейной линией. Наиболее распространенный материал шин – алюминий и его сплавы. Связь между шиной и краном осуществляется гибким кабелем, конструктивное исполнение которого зависит от длины перемещения крана.

При нагрузках до 1000 А применяются шины стандартного сечения до 60×8 мм. При нагрузках более 1000 А - шины до 120×10 мм [52].

Троллейная линия может быть выполнена троллейным шинопроводом, уголком, двутавровым профилем или квадратом. Уголок, двутавровый профиль или квадрат из стали имеют меньшую удельную стоимость, но большие удельные потери напряжения, чем комплектный шинопровод. Троллейные шинопроводы обеспечивают большую ремонтпригодность и уменьшение срока монтажа, однако их применение ограничено условием соблюдения допустимого тока при нагреве для мощных крановых установок.

Шины переменного тока выполнены по четырехпроводной схеме (три фазы и один нулевой), а троллейная линия - по трехпроводной схеме. Как правило, системы питания переменного тока предусматривает напряжение 380 В.

Длина троллейных линий или шин переменного (постоянного) тока определяется протяженностью причала, достигающего 100-300 м (длина причала достигает 300 м для порта «Южный» и 200 м для универсального перегрузочного комплекса г. Севастополь), или длиной пролета цехов, достигающих 120-350 м длины. Обычно число троллейных линий цеха равняется числу цеховых пролетов. Длина ремонтно-механических цехов обычно составляет до 120 м. Длина металлургических цехов имеет большую

протяженность, достигая 350 м (длина цехов горячей прокатки завода «Запорожсталь» – 290 м). Значительная протяженность пролета цеха, причала требует проверку троллейных линий, шин на потерю напряжения в самой удаленной точке питания крана.

Удельное сопротивление (проводимость) СЭК постоянного либо переменного тока в соответствии с физическими свойствами проводниковых материалов различно для алюминия и стали в зависимости от наличия или отсутствия волновых процессов, происходящих в них. Допустимые плотности тока по условию нагрева для алюминия и стали имеют различное значение (смотри таблицу 1.1) [52].

Таблица 1.1- Допустимые плотности переменного и постоянного тока для проводникового материала

материал	допустимая плотность переменного тока, А/мм ²	допустимая плотность постоянного тока, А/мм ²
алюминий	2,7...1,33	2,75...1,63
сталь	0,1...1,2	0,14...2,64

Меньшие значения характерны для проводникового материала большого сечения, большие значения – для проводников меньшего сечения.

В токопроводах переменного тока наблюдается явление поверхностного эффекта, что приводит к неполному использованию сечения проводникового материала. В связи с этим допустимая плотность постоянного тока больше, чем для переменного тока.

1.1.1 Анализ системы электропитания для кранов переменного тока

Характерной особенностью питания кранов на переменном токе является наличие троллейной линии или шины вдоль пролета цеха или причала, что вызывает существенную потерю напряжения в шине или троллейной линии вследствие их протяженности. Если допустимая потеря напряжения при пиковом токе превышает $\Delta U_{\text{доп}} = 5 \%$, то необходимо увеличивать сечение

или изменять расчетную длину троллейной линии, шины [90]. При значительной потере напряжения применяется подпитка. Наиболее экономичным методом является увеличение сечения, так как применение индукционной подпитки троллейной линии является более затратным мероприятием. Место подключения токопроводов выбирается при проектировании, обычно в середине троллейной линии или шины, поэтому ресурс для уменьшения потери напряжения в токопроводах является изначально ограниченным.

При использовании ЧРП на кранах вопрос повышения качества электроэнергии принимает особое значение [37, 84].

Например, при модернизации причала морского порта «Южный» [84, 85] для увеличения темпов погрузки-разгрузки грузов установка нового крана с ЧРП в конце линии, достигающей 300 м, имела трудности, связанные с увеличенным падением напряжения на шине, а именно его реактивной составляющей (ΔU_p) за счет индуктивности шины. Фазное напряжение в конце шинопровода равнялось 90 % от номинального значения при работе всех кранов при номинальном токе в режиме потребления, что негативно повлияло на качество [24] и эффективность работы системы питания. Для устранения данной проблемы была предложена установка конденсаторов для компенсации реактивной мощности на каждом кране или шунтирование шинопровода несколькими кабельными перемычками, имеющими меньшую индуктивность. Данные мероприятия потребовали дополнительных капитальных вложений [84].

Рассмотрению вопроса схемотехнических решений входного преобразователя для питания механизмов крана посвящено много работ [8, 21, 39, 50, 54, 73, 77, 87, 108, 109]. От его типа, конструкции и способа управления зависят энергетические показатели и надежность сети, питающей группу электроприемников. Применение одного входного выпрямителя для крана более экономически оправдано по сравнению с индивидуальными выпрямителями для каждого привода крана. Наличие конденсатора фильтра

в звене постоянного тока позволяет аккумулировать энергию торможения одного или группы двигателей и передавать ее другим двигателям по цепи постоянного тока, минуя сеть, и тем самым сократить потери во входном звене преобразователя частоты [20, 46, 62].

Однако емкость такого конденсатора должна обеспечить поглощение энергии рекуперации во избежание повышения напряжения либо использовать инвертор для рекуперации энергии или другой поглотитель энергии (управляемый резистор).

Для крановых установок переменного тока входное звено преобразователя частоты (ПЧ) может быть выполнено неуправляемыми, управляемыми выпрямителями или 4q преобразователями. Использование разных входных типов выпрямителей определяется особенностью механизма и режимами его работы [39, 72, 77, 105, 106].

Наиболее распространенными, простыми и сравнительно небольшой стоимости являются неуправляемые выпрямители. Выполняемые на диодах, они характеризуются максимальной простотой и надежностью, высоким КПД в эксплуатации, а также требуемым показателем качества выходного (выпрямленного) напряжения и гармоничного состава тока, потребленного из сети. Коэффициент искажения тока составляет 0,95 при достаточно большой индуктивности L_d -фильтра [77].

Энергия, поступающая в конденсатор фильтра, при торможении рассеивается в тормозном резисторе. Общее потребление электроэнергии крановых механизмов подъема при использовании такого выпрямителя зависит от относительного времени работы на сниженной скорости. Для стандартных мощностей двигателя подъема 30 кВт и 75 кВт в зависимости от относительного времени работы на сниженной скорости (5-20) % общее потребление уменьшается на (9-20) % [22]. При работе на активно-емкостную нагрузку [55], которая представляет собой ПЧ с емкостным фильтром, входные токи имеют непрерывный пульсирующий или прерывистый характер и отличаются высоким содержанием гармонических

составляющих. Содержание гармоник значительно увеличивается при увеличении использования мощности ПЧ от суммарной мощности, низкой индуктивности сети и низкой загрузки асинхронного двигателя. Коэффициент гармоник входного тока находится в пределах: (65-91) % в зависимости от отношения мощности ПЧ (14-2) % к мощности питающего трансформатора, (79-89) % от загрузки двигателя (номинальная и режим XX), (78-82) % от индуктивности сети, которая для сетей предприятий напряжением 0,4 кВ определяется в основном индуктивностью питающего трансформатора. При проведении экспериментов отсутствовали в составе ПЧ сетевые реакторы и дроссели контура выпрямленного тока [99, 100]. Возникающая проблема электромагнитной совместимости, которая заключается в генерировании ПЧ высших гармоник тока и снижении качества электроэнергии, требует своего исследования и решения [25-32, 37, 51, 66, 88, 100, 101, 118, 128, 132].

В большинстве случаев улучшение ЭМС входного неуправляемого выпрямителя с сетью достигается установкой входного реактора, необходимая индуктивность которого выбирается с учетом индуктивности сети [9, 22, 57, 78]. Применение входных реакторов приводит к известным преимуществам: ограничиваются скорости изменения тока и напряжения сети, наводящие помехи в силовых цепях и цепях управления приводом. Чаще всего применяется входной реактор с напряжением короткого замыкания $U_{кз} = 4 - 5 \%$ для обеспечения нормально допустимого значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения в соответствии с требованиями ГОСТ 13109-97 по качеству электроэнергии [24] и требований стандартов по электромагнитной совместимости нелинейных потребителей с сетью [120, 124]. Вместе с тем использование входного реактора приводит к ухудшению массогабаритных показателей электропривода в целом. Меры по снижению уровня генерируемых приводом гармоник тока даются «дорогой» ценой. Для того чтобы снизить уровень гармоник тока до $TDD_I = 37 \%$ (что далеко до разрешенного наиболее жестким стандартом

США уровня [121]), фирма «TELEMECANIQUE» в приводе ATV-66MCN4 мощностью 75 кВт (для регулирования скорости двигателя 100 л.с.) вынуждена применять входной реактор переменного тока. Снижение уровня высших гармоник потребляемого тока меньше 32-35 % не рационально из-за того, что каждый последующий процент этого снижения дается ценой 10% увеличения индуктивности реактора и, следовательно, такого же снижения питающего напряжения, что делает привод неработоспособным [19, 22]. Обеспечение коэффициента гармоник TDD_I в соответствии со стандартом IEEE 519-1992 [121] требует дополнительной установки фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ) в питающей сети [27, 28].

Новый подход, предложенный в [19, 42, 135], заключается в использовании специальных силовых широкополосных UHF фильтров для неуправляемых выпрямителей (Universal Harmonics Filter UHF или LMC-фильтров), разработанных совместно ИЭД НАН Украины и MIRUS Int. Corporation (Канада). Включение UHF между питающей сетью и выпрямительным мостом привода, как показали расчеты, моделирование и эксперименты, приводит к следующим результатам в номинальных режимах:

- подавлению 5-ой и 7-ой гармоник потребляемого из сети тока до уровня 2-4 % и резкому снижению общего искажения тока TDD_I или THD_I , как он назван в [120, 124], до 5-7 %;
- увеличению жесткости нагрузочной характеристики выпрямителя.

Коэффициент искажения TDD_I измеряется как отношение действующего значения токов высших гармоник к действующему значению максимального тока основной гармоники, измеренного в интервале 15 или 30 минут. Различие между THD_I и TDD_I заключается в методе измерения. Если имеется линейная и нелинейная нагрузка, подключённая к общей шине, то $THD_I = TDD_I$. Если измерить отдельно коэффициент искажения тока нелинейной нагрузки, то $THD_I > TDD_I$, т.к. основная гармоника нелинейной нагрузки будет меньше, чем полной нагрузки.

В работе рассматриваются нелинейные нагрузки, поэтому используется

показатель THD_I , как показатель электромагнитной совместимости.

Исследования ЧРП с UNF фильтрами проводились для неуправляемых выпрямителей.

Неуправляемые выпрямители не позволяют реализовать режимы рекуперации, необходимые для двигателей кранов, которые работают с частыми пусками и остановками [22, 73, 76, 81, 85]. Для получения максимального эффекта экономии электроэнергии для кранов с ПВ ≥ 40 % рекомендуется использовать выпрямитель с рекуперацией. При использовании в механизме подъема ПЧ с рекуперацией потребление электроэнергии снижается до 50-55 % по сравнению с ПЧ без рекуперации [22].

Возврат энергии в питающую сеть при торможении двигателей кранов осуществляют применяя:

- реверсивный тиристорный преобразователь, состоящий из двух включенных встречно-параллельно тиристорных выпрямителей, один из которых предназначен для протекания тока нагрузки в прямом, а другой – в обратном направлении,
- 4q преобразователь, состоящий из диодного моста, шунтированного полностью управляемыми ключами.

Реверсивный тиристорный преобразователь оказывает неблагоприятное воздействие на питающую сеть, что выражается в снижении коэффициента мощности (λ) за счет потребления реактивной мощности и мощности искажения. Общеизвестными недостатками реверсивных схем являются: увеличение угла регулирования α для обеспечения устойчивого инвертирования тока при рекуперации и опасность опрокидывания инвертора при больших значениях dU/dt [71, 75]. Увеличение α приводит:

- к снижению входного коэффициента мощности за счет увеличения, как амплитуды высших гармоник, так и увеличения потребления реактивной мощности из сети;
- к повышению уровня пульсаций выпрямленного напряжения;

- к снижению напряжения питания инверторов ЧРП, что приводит к увеличению токовой нагрузки двигателей. Для устранения этого эффекта необходимо завышать мощность двигателя или устанавливать согласующий автотрансформатор.

Использование реверсивных тиристорных преобразователей с совместным управлением приводит к появлению уравнивающего тока и дополнительно загружает вентили и трансформатор [71, 81].

Для устранения недостатков присущих реверсивным тиристорным преобразователям входное звено ПЧ выполняется с использованием 4q преобразователя, состоящего из диодного моста, шунтированного полностью управляемыми ключами, рисунок 1.2. [17, 61, 73, 85, 105, 106]. В качестве управляемых ключей используются IGBT-транзисторы [47].

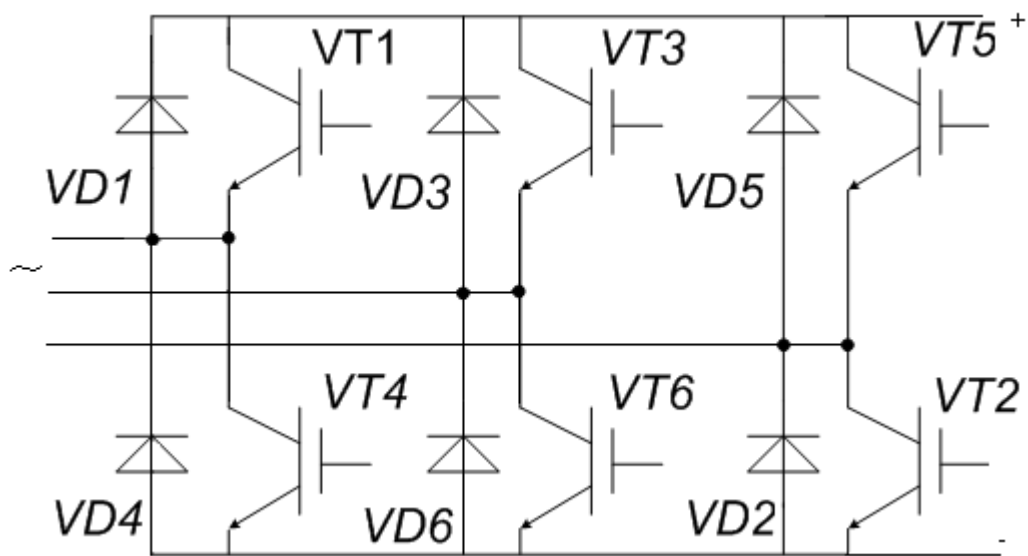


Рисунок 1.2 – Схема 4q преобразователя

Режим работы трехфазного мостового 4q преобразователя зависит от закона управления IGBT-транзисторами. Наиболее распространенные среди них:

- широтно-импульсная модуляция, в частности синусоидальная модуляция [17, 18, 29, 53, 69, 77, 89, 105, 106, 108, 109, 114, 120, 123, 129, 130] с коррекцией коэффициента мощности;

- управление ключами импульсом длительностью 120 гр. эл. и синхронизированного с работой соответствующих диодов, т.е. режим активного выпрямителя с двухсторонней проводимостью [61, 91].

Использование 4q преобразователя для повышения коэффициента мощности имеет ряд недостатков:

- обеспечение синусоидальной формы фазного тока в широком диапазоне изменения нагрузок требует установки входного реактора с $U_{кз}$ до 40 %, что приводит к повышению напряжения в звене постоянного тока до 880 В [40, 56] при номинальном напряжении двигателя 380 В;

- увеличенное напряжение на емкости фильтра вызывает повышенные потери в силовых ключах, конденсаторах и в двигателе;

- увеличение импульсного напряжения на обмотке статора АД связано с необходимостью использования специального двигателя с повышенным требованием к изоляции обмоток статора;

Указанные недостатки приводят к увеличению габаритов и стоимости, к дополнительным потерям на всех элементах преобразователя и соответственно к снижению его КПД [28].

Реже используется активный выпрямитель (АВ) с двухсторонней проводимостью. Для нагрузок, работающих в повторно-кратковременном режиме (ПКР) – краны, экскаваторы, для которых первоочередным требованием является простота и надежность, целесообразнее всего использовать АВ с двухсторонней проводимостью. В ОАО НИИ «Преобразователь» по договору с морским портом «Южный» было изготовлено инверторно-выпрямительное устройство, которое в [1, 4-7, 65-67] было названо «прозрачным» преобразователем, а в диссертационной работе АВ с двухсторонней проводимостью. В том же году он был испытан в порту «Южный» совместно с ПЧ типа ATV-58, (акт от 18 мая 2000 г .) приведен в приложении Е. АВ с двухсторонней проводимостью имеет утвержденные технические условия ТУ-29-04-00-2001 (00216964), технические параметры которого: $U_{ном} = 380В$, $P_{ном} = 300$ кВт, ток нагрузки $I_n = 540$ А в режиме

выпрямления и $I_n = 270\text{А}$ в режиме рекуперации, перегрузка по току в течение 10 с.

Применение АВ с двухсторонней проводимостью (ОАО «Рудавтоматика», Железнодорожск, РФ [59-61]) нашло практическое отражение и при модернизации оборудования экскаваторов.

Достоинством АВ с двухсторонней проводимостью является относительная высокая жесткость внешней характеристики и простота управления. Управление IGBT-транзисторами в АВ осуществляется импульсом прямоугольной формы, синхронизированным с работой соответствующего диода на протяжении 120° , что обеспечивает двухстороннюю проводимость. Такой упрощенный алгоритм управления не позволяет формировать синусоидальные входные токи преобразователя. Но коэффициент сдвига по основной гармонике близок к единице во всех режимах работы привода. Кроме того, такой алгоритм прост в реализации и надежен [91]. Напряжение в звене постоянного тока при работе ЧРП определяется внешней характеристикой неуправляемого выпрямителя в режиме потребления и рекуперации.

Использование АВ с двухсторонней проводимостью позволяет:

- обеспечить рекуперацию энергии в сеть и тем самым сэкономить 20-60% потребляемой электроэнергии в зависимости от интенсивности режима работы электроприемника [80]. Выбор мощности устройства рекуперации производится по информации о реальном цикле работы крана [81],
- повысить $\cos\varphi$ (за счет отказа от управляемых тиристоров),
- повысить устойчивость работы преобразователей в режиме рекуперации при колебаниях напряжения в питающей сети.

Однако АВ с двухсторонней проводимостью имеет ряд недостатков:

- различная форма фазного тока в режиме рекуперации и выпрямлении вызывает различный уровень амплитуд гармонических составляющих, что требует дополнительных исследований;
- низкий коэффициент мощности, характерный для электроприводов,

работающих в ПКР, особенно, в области нагрузок $(0-0,5) P_{\text{ном}}$ [61].

Этот недостаток характерен и для электроприводов с АИН-ШИМ. Поскольку при пуске и торможении крана мощность изменяется от 0 до P_{max} и соответствует выходной мощности входного выпрямителя без учета КПД, то при постоянном напряжении на входе выпрямителя его ток изменится от 0 до I_{max} , хотя ток нагрузки в это время может быть неизменный.

Характер процессов указанного АВ при потреблении непрерывного тока аналогичен при работе неуправляемого выпрямителя [55, 59, 89]. Однако, режим рекуперативного торможения при изменении тока от максимального значения тока до режима ХХ с учетом специфики коммутации управляемых ключей преобразователя требует дополнительного исследования для устранения указанных выше недостатков.

В работах [29, 125, 128] освещены разные вопросы выбора силового LC-фильтра АВ, который называют «синусным» фильтром. Индуктивное сопротивление «синус»-фильтра составляет 15-20 % $U_{\text{кз}}$ при частоте ШИМ АВ на уровне 3 кГц [40]. Установка дросселя в «синус»-фильтрах неизбежно приводит к снижению жесткости внешней характеристики его источника питания и, как следствие, уменьшается напряжение на выходе ПЧ. Несмотря на его преимущества, такие как рекуперация энергии в сеть, работа преобразователя частоты с заданным значением коэффициента мощности, АВ обеспечивает синусоидальную форму входного тока [18, 19, 34, 69, 77, 89, 102, 105, 108, 109, 120, 122, 127, 133], частота коммутации IGBT-транзисторов достигает до 10 кГц, что приводит к дополнительным динамическим потерям. Наличие различных подходов вызывает необходимость дополнительных исследований в выборе рациональных параметров «синус»-фильтров, реакторов и других элементов.

Вопрос выбора фильтрующего устройства (реактор, ФКУ, LMC-фильтр) для указанного АВ с учетом режима рекуперации не рассматривался должным образом. Совместное использование реактора (как наиболее дешевого и повсеместно рекомендуемого) и резонансных фильтров приводит

к значительному увеличению массогабаритных показателей. Помимо этого, при совместном использовании сетевого реактора и ФКУ для нелинейной нагрузки наблюдается слабозатухающий характер переходных процессов и снижение быстродействия [51].

При установке группового ФКУ на распределительном устройстве (РУ) трансформатора, на шине переменного тока, протяженность которой может достигать до 330 м, возникают дополнительные потери, обусловленные двухсторонней циркуляцией энергии рекуперации между системой питания и электроприводами кранов [46], что снижает эффективность системы и отрицательно влияет на показатели качества электроэнергии, нормируемые ГОСТ 13109-97 [24].

Применение трехступенчатого индивидуального ФКУ для тиристорного привода экскаватора установленной мощностью 1300 кВт, работающего в ПКР с двойными фильтрами на 5 и 7 гармонику, рассмотрено в [68]. Одна, меньшая часть ФКУ представляет собой глухую, постоянно подключенную к сети ступень фильтра 7-ой гармонической составляющей. Две другие сдвоенные ступени (на пятую и седьмую гармонику) подключаются к глухой ступени по мере роста потребляемого тока. Коэффициент искажения синусоидальности напряжения находится на достаточно высоком уровне 4,475 % [68], что менее нормируемого 8 % [24]. Коэффициент искажения токов на высокой стороне трансформатора составляет в среднем 0,97. Лишь при нагрузочном токе $< 0,1$ от номинального коэффициент искажения входного тока составляет 0,8-0,9, однако он не вносит критичных искажений в форму напряжения. Совместная работа нескольких приводов улучшает формы токов и напряжений на стороне НН трансформатора по сравнению с работой одного, пусть даже самого мощного привода при использовании трехступенчатого ФКУ.

Для быстрого включения и отключения ФКУ (5, 7 гармоника) [107] целесообразно применять тиристорные управляемые ключи, включенные в соответствии со схемой преобразователя и позволяющие управлять ФКУ в

течение одного периода. При отключении импульсов управления токи плавно снижаются до нуля, а напряжение на ключах не превышает двойного амплитудного значения. Для исключения пусковых токов управление тиристорами осуществляется с помощью широких импульсов управления, сдвинутых на 120° вперед относительно точки естественной коммутации (в месте появления реактивного тока) [107].

При исследовании части энергосистемы напряжением 35-110 кВ Сибайского энергоузла было установлено, что величина добавочных потерь, вызванных протеканием тока высших гармонических составляющих (при использовании трехфазной мостовой схемы выпрямления) без принятия мер для их компенсации составляет до 7 % от общих нагрузочных потерь [25, 87].

Вопрос оценки показателей качества электроэнергии и добавочных потерь в системе питания кранов с ЧРП с рекуперацией в полном объеме не рассматривался.

1.1.2 Анализ системы электропитания кранов постоянного тока

В отраслях промышленности, особенно в металлургии, нашли применение СЭК постоянного тока, которые питаются от общего выпрямителя с напряжением 220-440 В .

Применение постоянного тока было связано с необходимостью использования двигателей постоянного тока. Наличие релейно-контакторного управления приводит к увеличению потерь мощности, потери напряжения и расходу материала токопровода. Для реализации системы питания постоянного тока требуется преобразовательная подстанция, наличие которой приводит к увеличению капитальных затрат на 30 – 50 % по сравнению с аналогичными системами переменного тока [95].

Применение токопроводов систем постоянного тока позволяет:

- упростить конструкцию токопроводов;
- уменьшить потери напряжения за счет отсутствия индуктивного сопротивления, характерного для систем переменного тока.

Наличие дросселя в звене постоянного тока улучшает коэффициент мощности выпрямителя [39,89].

Поскольку использование АД с ЧРП предусматривает использование в основной массе двухзвенных ПЧ с наличием общей шины на кране, что существенно повышает эффективность кранового электропривода, то возникает вопрос о практической целесообразности использования общей шины постоянного тока для нескольких кранов.

С увеличением объема использования силовой электроники во всех отраслях промышленности линии постоянного тока находят все большее применение. Известен опыт применения линии постоянного тока при модернизации парка газоперекачивающих агрегатов с использованием высоковольтных ЧРП в РФ и Норвегии. Отличительная черта привода заключается в том, что высоковольтный активный выпрямитель расположен на береговой подстанции, а инвертор и двигатель – на плавучей платформе. Линия постоянного тока (протяженностью 70 км) проложена по морскому дну [126]. Использование такого схмотехнического решения уменьшает экологические проблемы, повышает эффективность работы сети и обеспечивает необходимые показатели качества электроэнергии. В Норвегии функционируют шесть регулируемых приводов компрессорной станции с линией постоянного тока, мощность каждого составляет 60 МВт (месторождение Тролл) [126].

В наиболее ответственных механизмах с ЧРП со звеном постоянного тока было предложено выполнить резервирование от сети постоянного тока, что повышает надежность и осуществляет стабилизацию напряжения звена постоянного тока ПЧ, а также двунаправленный обмен энергии с резервной сетью постоянного тока. При этом сохраняется все положительные характеристик для индивидуального механизма [103].

Использование общей магистрали постоянного тока позволяет повысить целесообразность применения многофазного выпрямителя для нагрузки более 1000 кВт [25, 88, 96].

Повышение пульсности преобразования связано с применением входных трех- и четырехобмоточных трансформаторов, что, хотя и удорожает ПЧ, но зато позволяет улучшить ПКЭ и ЭМС с питающей сетью без дополнительных фильтров.

Увеличение пульсности входного выпрямителя с 6 до 12 позволяет снизить относительное значение пульсаций тока в звене выпрямления почти в 3 раза, что составляет величину до 2 %. Использование схем 18 – 24 пульсности для выпрямителей мощностью более 1500 кВт (в зарубежной практике фирма «Allen Bradley») с соответствующим трансформатором [25, 26, 87] позволяет достичь относительных значений пульсаций тока в звене выпрямления до 1% и обеспечить повышение ЭМС с сетью.

Модернизация оборудования прокатного стана мощностью 12 МВт (завод «Запорожсталь») была произведена с помощью ПЧ, выпрямители которого реализуют 18-пульсную схему. Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения по ГОСТ 13109-97 [24] на шинах 10 кВ находится в пределах 0,97 – 4,99 % . На частотах 3500 – 5000 Гц наблюдается режим резонансного усиления гармоник и их значения доходят до 1 % [70]. Рекомендующим средством является установка широкополосного фильтра фирмы АВВ, мощность которого составляет 20 % от мощности оборудования [80].

Применение 24-фазного преобразователя возможно при использовании двух трансформаторов, первичные обмотки, фазосдвигающие и сетевые части которых соединены в «неравноплечевой зигзаг». Основным преимуществом такого схемотехнического решения является снижение коэффициента гармоник сетевого тока в 63 раза до значения 1,26 % , и в 13,7 раза до значения 1,62 % в зависимости от типа нагрузки, что обеспечивает ЭМС с питающей сетью в соответствии со стандартом IEEE 519-1992 [121]. Применение 24-фазного преобразователя практически исключает установку фильтров высших гармоник. При этом величина добавочных потерь в питающей сети составляет до 1 % от общих нагрузочных потерь [25, 87, 134].

Замена двигателей постоянного тока на ЧРП существенно уменьшает эксплуатационные затраты и позволяет использовать существующую систему СЭК, при этом перевод ее на напряжение 500-540 В приводит к снижению токовой нагрузки, а соответственно потерь мощности и напряжения, и повышения пропускной способности токоведущего материала.

Вопрос оценки показателей качества электроэнергии и добавочных потерь в системе питания постоянного тока с крановыми установками, оснащенных ЧРП, изучен в недостаточной степени, что вызывает необходимость дополнительных исследований.

1.2 Методы и постановка задач исследования

При проектировании систем электропитания для электроприемников, работающих в ПКР, выбор рациональной системы питания (на постоянном или переменном напряжении) определяется по критерию минимальных приведенных затрат с учетом типа используемого привода.

Наиболее часто встречающимся технико-экономическим критерием эффективности систем электропитания является критерий приведенных затрат, по минимуму которого из нескольких вариантов структуры системы электропитания выбирается наиболее рациональный вариант. В рассматриваемый критерий входят как технические параметры системы, так и экономические факторы при ее эксплуатации [94, 95, 98].

Учет показателей качества при передаче и потреблении электроэнергии в критерии оптимальности дает возможность более обосновано произвести выбор системы питания постоянного [34, 75] или переменного напряжения [41, 95]. Показатели качества электроэнергии и электромагнитной совместимости в Украине и зарубежной практике нормируются требованиями ГОСТ 13109-97 [24] и стандартом IEEE 519-1992 [121] или МЭК 61000-3-12:2004, МЭК 61800-3:2012 [124, 120], в значительной степени влияют на надежность и стоимость СЭК [87].

При расчете электрических нагрузок для группы кранов используют данные электропотребления за цикл или за сутки, которые представлены в виде графика электрических нагрузок или расчетного способа, основанного на вероятностном определении получасового максимума (метод упорядоченных диаграмм или как он был впоследствии переименован метод расчетных коэффициентов) [41, 90, 95, 98]. При использовании графиков нагрузки точность расчета определяется погрешностью измерения и составляет около 2 %. Однако, не всегда представляется возможным получить реальные данные при построении графика. Кроме того, графики нагрузки за цикл могут изменяться в течение суток, поэтому максимум нагрузки, рассчитанный для суточного графика, может иметь большую погрешность. Метод упорядоченных диаграмм или расчетных коэффициентов наиболее точный (погрешность до 5 %) из вероятностных методов расчета электрических нагрузок в сетях напряжением до 1 кВ по сравнению с другими методами (метод коэффициента спроса, удельных показателей). Использование метода упорядоченных диаграмм в качестве расчетного, позволяет производить расчет без реальных данных об энергопотреблении.

Для анализа электромагнитных процессов применяются методы из теории электрических цепей, служащие для математического описания электромагнитных процессов, протекающих в сетях, преобразователях и промышленных нагрузках. При выполнении аналитического расчета токов и напряжений для применяемых полупроводниковых преобразователей в большинстве случаев возникают затруднения, поэтому есть необходимость в использовании имитационного моделирования [2, 23, 104]. Принимая во внимание дороговизну проведения экспериментальных исследований (из-за относительно высоких стоимостей макетного или опытного образцов преобразователей, элементов нагрузок, испытательного оборудования и контрольно-измерительных приборов), применение имитационного моделирования позволяет не только удешевить исследования, снизить

трудоемкость и сроки проведения, но и одновременно увеличить количество и качество исследуемых режимов и вариантов нагрузок.

Методы математического анализа и решения уравнений [48] предназначены для определения оптимальных электрических параметров рабочих режимов сетей, которые соответствуют минимизации в них потерь мощности. Для подтверждения полученных результатов диссертационной работы экспериментальные исследования выполнялись на заключительном этапе.

В результате анализа установлено:

- питание крановых установок осуществляется на переменном или постоянном токе;
- для модернизации электроприводов крановых механизмов с интенсивным циклом работы используется ЧРП с рекуперацией энергии преимущественно с шиной постоянного тока на кране;
- для повышения эффективности мощных систем питания, оснащенных ЧРП, находят применения линии постоянного тока;
- для рекуперации энергии в ЧРП преимущественно находят применение 4q преобразователи с коррекцией коэффициента мощности, что приводит к необходимости повышения напряжения в звене постоянного тока, к увеличению коммутационных потерь в элементах ПЧ, к ухудшению условий работы изоляции двигателя и к увеличению установленной мощности оборудования за счет использования «синус»- фильтра на входе;
- массовое внедрение ЧРП на крановых установках требует пересмотра концепции построения СЭК, которые ранее были ориентированы на применение электроприводов постоянного или переменного тока с релейно-контакторным управлением.

В результате анализа состояния разработок и исследований систем электропитания кранов сформулирована постановка задач исследований.

2 СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КРАНОВ С ЧАСТОТНО – РЕГУЛИРУЕМЫМ ПРИВОДОМ

В первой главе показано, что в существующей практике применяется две системы питания кранов: переменного и постоянного тока.

Система электропитания кранов в общем случае состоит из линий ВН (высокого напряжения), НН (низкого напряжения) и трансформатора между ними (без учета коммутационно-защитных аппаратов). Линии НН выполняют шинопроводом, кабельной или троллейной линией. При исследовании параметры системы питания приводятся к стороне НН трансформатора, так как в этом случае большинство из параметров (нагрузка вторичной обмотки трансформатора) представляет собой их реальные значения. Общим свойством системы питания в случае применения ЧРП является наличие выпрямителя между питающей сетью и приводным механизмом. Место расположения входного выпрямителя определяет род системы питания токопровода: постоянный или переменный ток.

В связи с увеличением использования ЧРП возникает необходимость в дополнительном исследовании подходов и принципов построения системы электропитания кранов (СЭК). Эффективность систем питания кранов определяется капитальными и эксплуатационными затратами при обеспечении электромагнитной совместимости (ЭМС) в соответствии с требованиями стандарта IEEE 519-1992 [121] или [120,124], что определяется требованиями заказчика и ПКЭ в соответствии с ГОСТ 13109-97 [24] .

Ниже исследованы концепции построения СЭК с ЧРП, их достоинства и недостатки. Реализация рационального варианта СЭК с ЧРП новых или модернизируемых систем питания осуществляется на основе сравнительного анализа.

Исследования проведены для двух наиболее распространенных СЭК переменного и постоянного тока, которые выполнены шинами или троллейными линиями.

2.1 Схемы замещения систем электропитания кранов

СЭК переменным током характерна для большинства видов кранов: порталных, мостовых, башенных, козловых и др.

СЭК постоянным током характерна для кранов металлургических производств (грейферные краны рудного двора, разливные мартеновского цеха, клещевые для прокатных цехов).

Широкое использование ЧРП для механизмов крана требует проведения сравнительной оценки эффективности СЭК для различного рода тока.

Современные ЧРП, как правило, выполняются по схеме двухзвенных преобразователей частоты (ПЧ), состоящих из выпрямителей и инверторов для питания электродвигателей механизмов крана. В первой главе показано, что наиболее рациональной схемой группового ЧРП крановых механизмов является установка одного входного выпрямителя (В) и группы инверторов (И), обеспечивающих частотное управление двигателями механизмов. Такое схемное решение предусматривает шину постоянного тока на кране с возможностью обмена энергией рекуперации между электроприводами механизмов крана.

Шины или троллейные линии, которые применяются для питания различных кранов на переменном или постоянном токе, имеют значительную протяженность. Количество крановых установок, питающихся от шины либо троллейной линии, определяется длиной причала или длиной пролета цеха. Для одного крана минимальная длина пролета составляет 35-45 м, что регламентируется использованием крановых установок.

Количество кранов для металлургического производства определяется объемом плавки и выпуском продукции и принимается до 5-6 при длине пролета цеха до 350 м [94].

Замена релейно-контакторного управления асинхронными двигателями и двигателей постоянного тока на ЧРП обуславливает необходимость альтернативных решений для СЭК с ЧРП на постоянном или переменном

токе. Выбор технического решения требует проведения соответствующего сравнительного анализа.

На рисунках 2.1 и 2.2 представлены обобщенные СЭК переменного и постоянного тока.

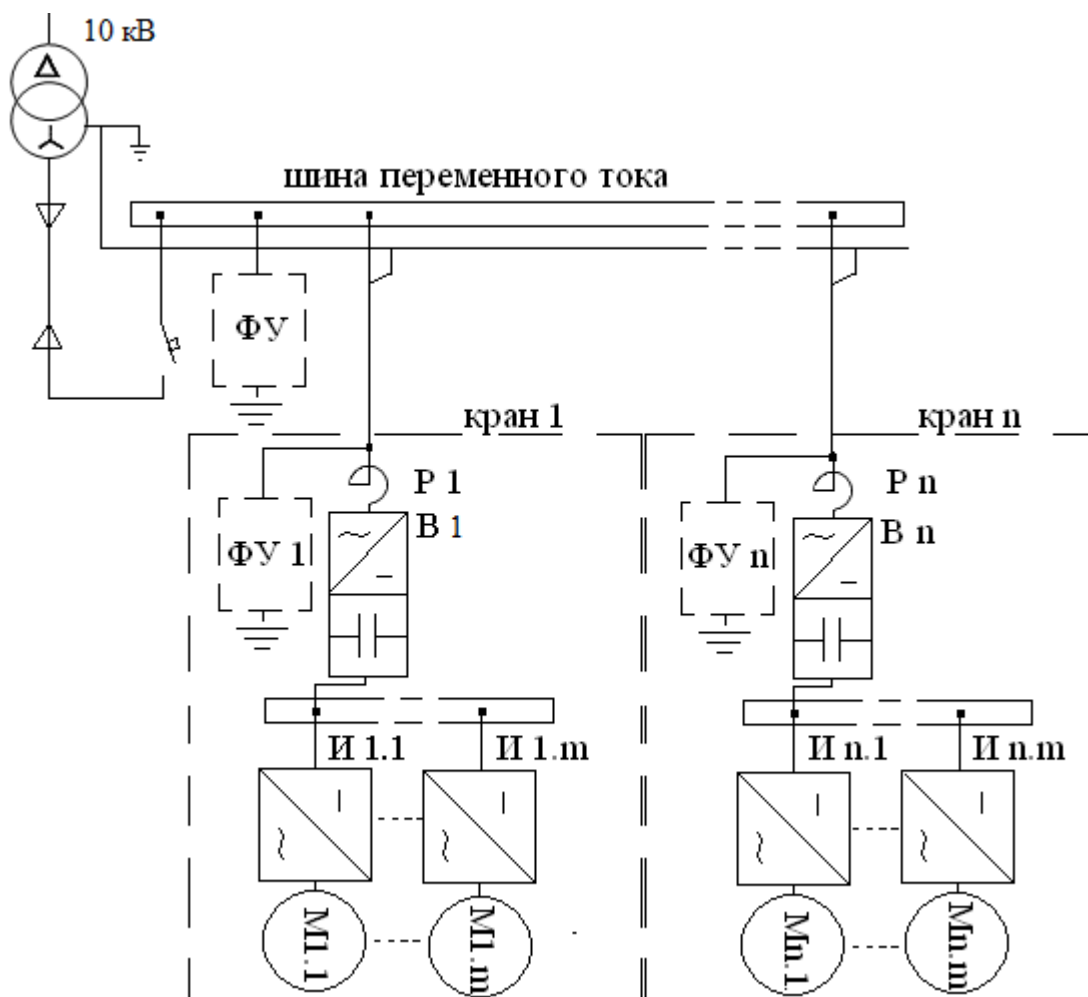


Рисунок 2.1 – Обобщенная схема СЭК переменного тока

СЭК переменного тока, выполненная шинами, рассмотрена на примере питания порталных кранов, рис А. 1, приложение А. Количество порталных кранов 300-метрового причала порта «Южный» – четыре, грузоподъемность для каждого 16 т. Электропитание ЧРП кранов осуществляется от шинопровода через электрические колонки. Размещение колонок предусматривается с дистанцией 35-40 м по длине шинопровода [85].

Питание шин или троллейных линий системы питания на постоянном токе осуществляется от трехфазного мостового выпрямителя, устанавливаемого на РУ - 0,4 кВ, а питание ЧРП крановых механизмов осуществляется от устанавливаемых индивидуальных инверторов для приводов каждого крана.

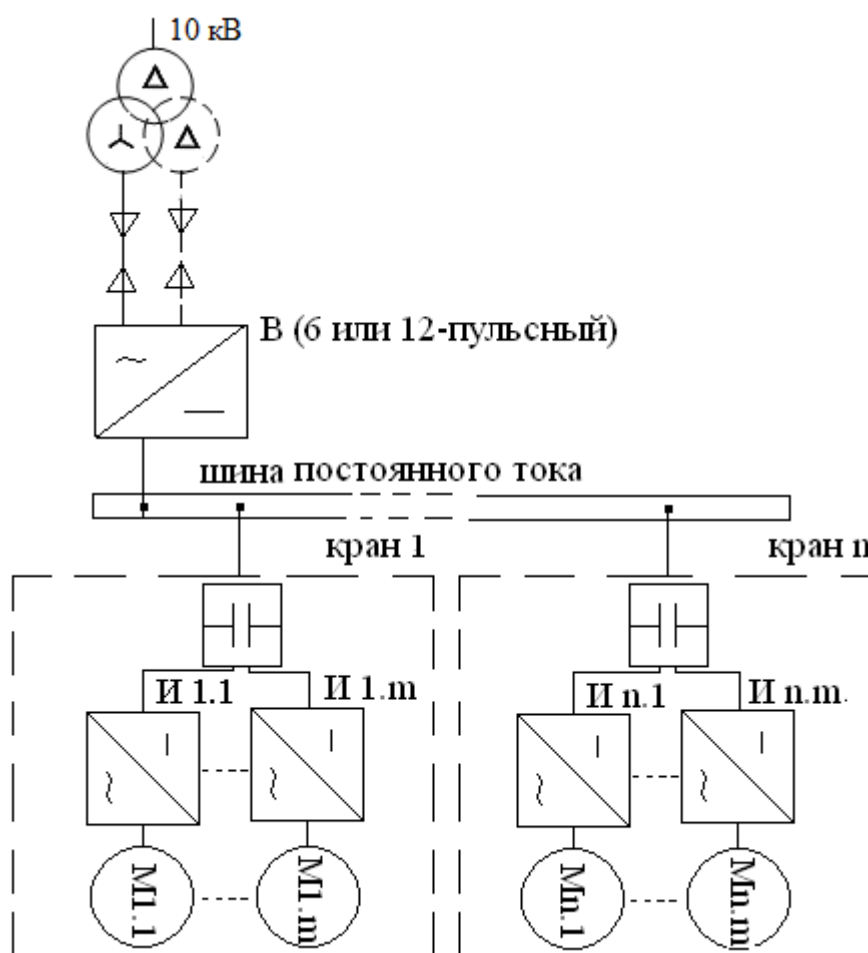


Рисунок 2.2 – Обобщенная схема СЭК постоянного тока

Схема питания с шиной постоянного тока исследуется на примере СЭК цеха горячей прокатки завода «Запорожсталь» с пятью мостовыми кранами для 290-метрового пролета цеха (четыре – грузоподъемностью по 80 т, один – грузоподъемностью 50 т), рисунок Б. 1, приложение Б.

Использование ЧРП с АД напряжением 380 В требует применения уровня напряжения 540-600 В на шине постоянного тока вместо ранее

используемого уровня напряжения 440 В (220 В). Это приводит к снижению токовой нагрузки шины или троллеи на $k_1 = 440(220)/540 \div 600 = 0,81 \div 0,73(0,41 \div 0,375)$, что в свою очередь обеспечивает снижение потери напряжения в 1,25-2,5 раза, а так же потерь мощности в 1,56-6,25 раза в системе питания.

Для выполнения сравнительного анализа полагаем, что системы электропитания с шиной переменного и постоянного тока работают в установившемся режиме при равнозначной суммарной номинальной нагрузке двигателей кранов.

При составлении схемы замещения для СЭК учитывались следующие допущения:

а) симметрия (равенство) фазных параметров элементов СЭК: линии ВН, трансформатора, линии НН (и о вытекающем из этого равенстве упомянутых параметров эквивалентной схемы замещения);

б) постоянство амплитуды, синусоидальности формы и симметрия текущих фазных значений напряжений на вторичной обмотке силового трансформатора $U_A(t), U_B(t), U_C(t)$;

г) индуктивные сопротивления всех элементов сети считаются постоянными и не зависящими от тока, не учитывается насыщение магнитных систем и намагничивающие токи силового трансформатора;

д) расчет токовых нагрузок, сечений шин и троллейных линий проводится по основной гармонике.

Схемы замещения для СЭК с шинами переменного и постоянного тока приведены на рисунке 2.3 (а, б). Источник (И) в схемах замещения – симметричная система напряжений ограниченной мощности. Питающая сеть имитируется последовательными $R_i L_i$ цепочками с соответствующей индуктивностью и активным сопротивлением: трансформатором (Т) – $R_T L_T$, кабельной линией (КЛ) – $R_{КЛ} L_{КЛ}$, шинопроводом (Ш) – $R_{Ш} L_{Ш}$. Гибкий кабель в системе питания кранов переменным током имитируется

индуктивностью КЛ L_n .

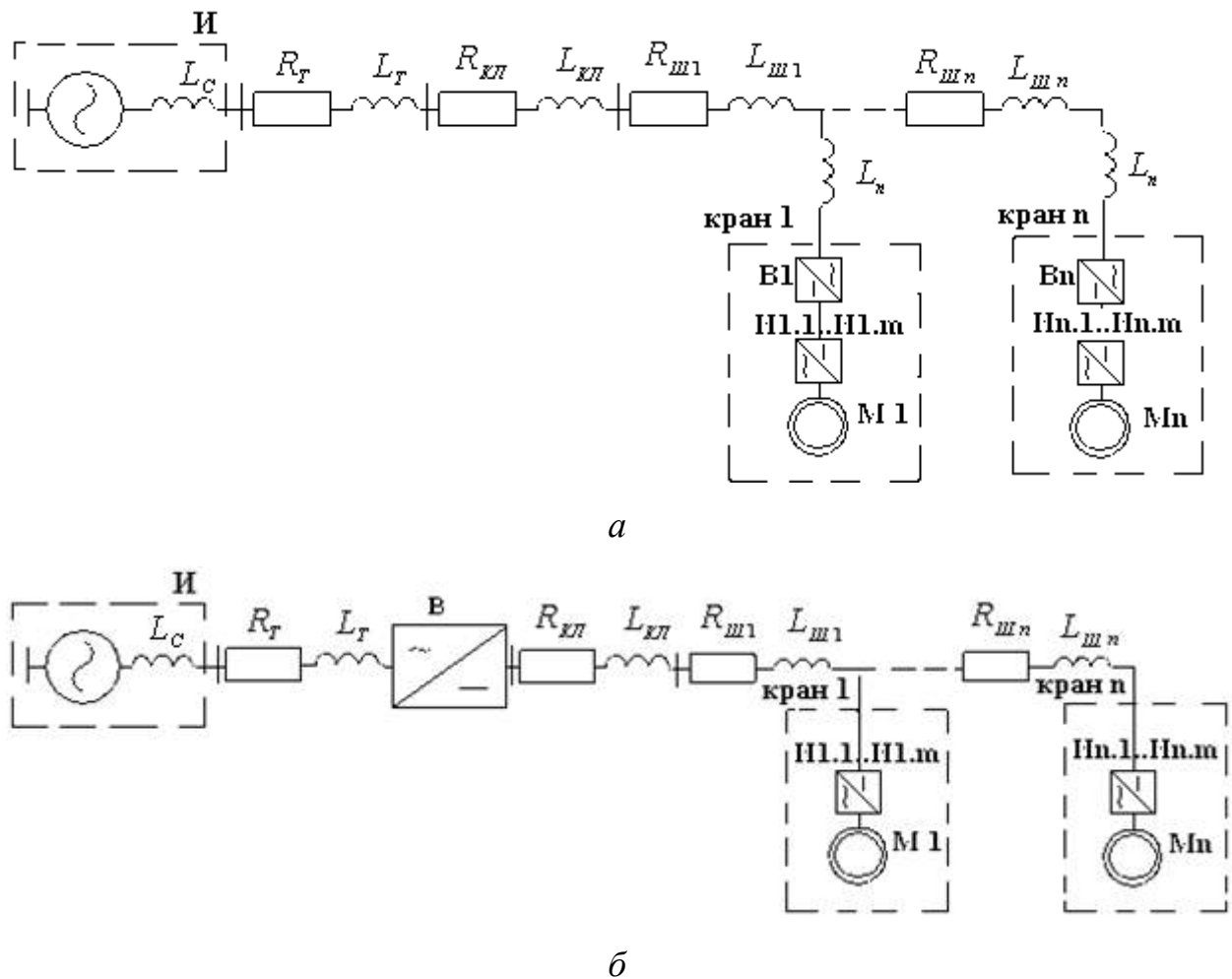


Рисунок 2.3 – Схема замещения СЭК переменного тока (а), постоянного тока (б)

Расчет элементов (системы (С), трансформатора (Т), кабельной линии (КЛ), шинпровода (Ш)) СЭК [94] производился по приведенным выражениям (2.1-2.5). Численные значения которых, приведены в приложении А (Параметры системы электропитания кранов переменного тока) и в приложении Б (Параметры системы электропитания кранов постоянного тока).

$$X_C = \frac{(U_{HH})^2}{\sqrt{3} \cdot I'' \cdot U_{BH}}, \text{ Ом} \quad (2.1)$$

где U_{BH}, U_{HH} – соответственно высокое, низкое напряжения трансформатора, кВ.

I'' – ток КЗ на шине 10кВ, кА.

$$R_T = \frac{\Delta P_{K3} \cdot (U_{HH})^2 \cdot 10^{-3}}{(S_{НОМ})^2}, \text{Ом} \quad (2.2)$$

$$Z_T = \frac{U_{K3}}{100} \cdot \frac{(U_{HH})^2}{S_{НОМ}}, \text{Ом} \quad (2.3)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}, \text{Ом} \quad (2.4)$$

где $\Delta P_{K3}, U_{K3}, S_{НОМ}$ – соответственно потери КЗ, кВт, напряжение КЗ, %, мощность трансформатора, МВА.

$$R_{KL} = \frac{R_0}{n} l, X_{KL} = \frac{X_0}{n} l, R_{III} = \frac{R_0}{n} \cdot l, X_{III} = X_0 \cdot l, \text{Ом} \quad (2.5)$$

где R_0, X_0 – удельные параметры КЛ, шинопровода, мОм/м,

l, n – длина КЛ, шинопровода, м и количество КЛ и полюсов шин.

Для сравнительной оценки влияния суммарного индуктивного сопротивления систем переменного и постоянного тока было выполнено приведение индуктивных сопротивлений элементов схем замещения к базисной мощности (S_σ) и к базисному напряжению (U_σ).

$$X_{*\sigma} \% (U_{K3}) = X_\sigma \frac{S_T}{U_\sigma^2} \cdot 100\% \quad (2.6)$$

Для схем питания переменного тока и постоянного тока за базисное напряжение было принято напряжение низкой обмотки трансформатора

$$U_{\sigma} = U_{HH} = 0,4 \text{ кВ.}$$

Напряжение короткого замыкания (КЗ) системы питания переменного тока, приложение А, относительно мощности трансформатора (S_T), составляет $U_{K3}(S_T) = 9,8-19,15 \%$, соответственно, до пункта подключения первого и последнего крана.

Напряжение КЗ СЭК постоянного тока относительно мощности трансформатора (S_T) составляет $U_{K3}(S_T) = 6,26 \%$.

Для сравнительной оценки эффективности СЭК постоянного и переменного тока используются следующие критерии:

- расчетные мощности СЭК;
- расчетные сечения токопроводов;
- допустимые потери напряжения в токопроводах;
- потери мощности в токопроводах.

2.2 Оценка расчетных мощностей систем электропитания кранов

Для выбора оптимальной мощности трансформатора при проектировании систем питания или оптимального коэффициента загрузки трансформатора при модернизации существующих СЭК необходимо оценить значение расчетной мощности.

Расчет нагрузки производится методом упорядоченных диаграмм или расчетных коэффициентов [41, 90, 95].

Для указанных методов реальное число электроприемников (ЭП) n заменяется на эффективное ($n_{эф}$), которое соответствует числу ЭП одинаковых по мощности и режиму работы, создающих такие же условия по нагреву, как и реальное число ЭП [41].

$$n_{эф} = \frac{(\sum_{i=1}^n P_{ном i})^2}{\sum_{i=1}^n P_{ном i}^2} \quad (2.7)$$

$P_{ном i}$, $P_{ном i} = P_{уст i} \sqrt{ПВ}$ – номинальная мощность i -го ЭП, кВт;

$P_{уст i}$ – установленная мощность i -го ЭП, кВт;

ПВ – продолжительность включения, о.е.

Одна крановая установка, как правило, содержит 3-5 двигателей для механизмов подъема основного (или вспомогательного), передвижения крана, передвижения тележки, либо механизмов поворота (или вращения хобота), либо механизм захвата грейфера (при его наличии).

Число ЭП системы питания переменного тока соответствует числу кранов с установкой выпрямителя на кране. Число ЭП составляет, как правило, $n = 2 \div 4$, за редким исключением, $n = 5$ [52, 94]. Для $n = 3 \div 5$ принимается $n_{эф} = n$ при подключении кранов одинаковой мощности [41,52], что характерно для морских портов, ремонтно-механических, цехов.

Число ЭП, питающихся от шин постоянного тока или троллейных линий, соответствует числу инверторов для двигателей крановых установок. Наличие большего числа приводов крановых установок, питающихся от шин постоянного тока, приводит к увеличению n и соответственно $n_{эф}$. Увеличение $n_{эф}$ приводит к снижению значения расчетной мощности СЭК постоянного тока за счет уменьшения величины коэффициента максимума (k_{max}), который характеризует несовпадение максимумов нагрузки отдельных ЭП, подключенных к одному узлу.

Зависимость $n_{эф-} = f(n, P_{ном i})$ СЭК постоянного тока показана на рисунке 2.4 на примере цеха горячей прокатки ОАО «Запорожсталь» (приложение Б) для различного количества кранов ($2 \div 5$), а расчетные значения $n_{эф-}$ приведены в таблице Б.2. Для количества кранов равном пяти ($n = 20$) значения $n_{эф-}$ изменяется от 9 до 11,3 в зависимости от суммарной номинальной мощности крана (рисунок 2.4). Причем большее значение $n_{эф-}$ соответствует большей суммарной номинальной мощности крана.

Сравнительный анализ СЭК проводился при изменении значений $n_{эф-}$ СЭК переменного тока в диапазоне $3 \div 5$ и при изменении значений $n_{эф-}$ СЭК постоянного тока в диапазоне $3,6 \div 11,3$.

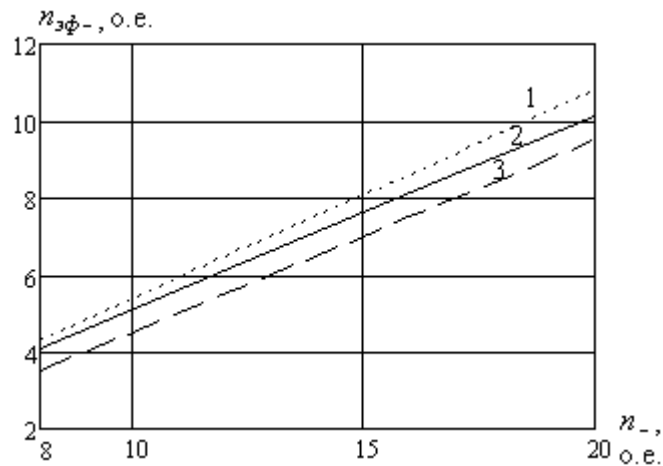


Рисунок 2.4 – Зависимость $n_{эф} = f(n)$ СЭК постоянного тока

($\cdots$) – для двигателей кранов, суммарная номинальная мощность крана, $P_{ном} = 175,8$ кВт;

(–) – для двигателей кранов, суммарная номинальная мощность крана, $P_{ном} = 74,2$ кВт ;

(- -) – для двигателей кранов, с $P_{ном} = 175,8$ кВт и $P_{ном} = 74,2$ кВт

Определение расчетной мощности СЭК выполняется по соотношениям [41, 90, 95] :

$$P_{расч} = k_{max} P_{ср}, \quad (2.8)$$

$$P_{расч} = k_{расч} P_{ср},$$

где k_{max} – коэффициент максимума, который определяется по соотношению $k_{max} = 1 + \frac{1,5}{\sqrt{n_{эф}}} \sqrt{\frac{1-k_{исп}}{k_{исп}}}$ [95], о.е.

$k_{расч}$ – расчетный коэффициент, значения которого приведены в таблице [90], о.е.;

$P_{ср}$ – средняя потребляемая мощность, кВт;

$$P_{ср} = \sum_{i=1}^n k_{исп i} P_{ном i}$$

$k_{исп}$ – средневзвешенный коэффициент использования, о.е.;

$$k_{исп} = \sum_{i=1}^n k_{исп i} P_{ном i} / \sum_{i=1}^n P_{ном i}$$

$k_{\text{исп } i}$ – коэффициент использования i -го ЭП, о.е.

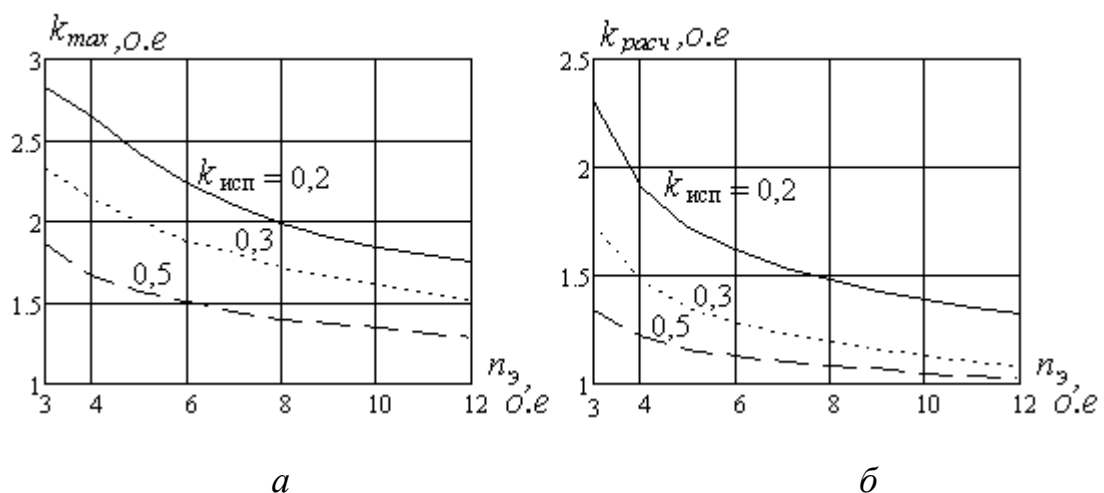
Метод упорядоченных диаграмм дает завышенное значение расчетных мощностей по сравнению с методом расчетных коэффициентов. Однако, он удобен поскольку позволяет аналитически оценить влияние отдельных составляющих, характеризующих нагрузку ЭП. Для оценки возможности применения формулы расчетной мощности аналитическим методом проведен сравнительный анализ методов упорядоченных диаграмм и расчетных коэффициентов путем сравнения коэффициентов максимума (k_{max}) и расчетных ($k_{\text{расч}}$), а также их отклонения: $\Delta k^* = \left(\frac{k_{\text{max}}^* - k_{\text{расч}}^*}{k_{\text{max}}^*} \right) \cdot 100\%$, рисунок 2.5.

Относительный коэффициент расчетных мощностей СЭК постоянного тока к переменному току с учетом (2.7-2.8) по методу упорядоченных диаграмм принимает вид:

$$P_{\text{расч}}^* = \frac{P_{\text{расч-}}}{P_{\text{расч-}}} = k_{\text{max}}^* = \frac{k_{\text{max}}}{k_{\text{max-}}} = \frac{(\sqrt{k_{\text{исп}} n_{\text{эф-}}} + 1,5\sqrt{1-k_{\text{исп}}})}{\sqrt{n_{\text{эф}}^*} \cdot (\sqrt{k_{\text{исп}} n_{\text{эф-}}} + 1,5\sqrt{1-k_{\text{исп}}})} \quad (2.9)$$

где $n_{\text{эф}}^* = n_{\text{эф-}}/n_{\text{эф-}}$ – отношение эффективного числа ЭП постоянного к переменному току.

На рисунке 2.5 представлены зависимости: $k_{\text{max}} = f(n_{\text{эф}})$, $k_{\text{расч}} = f(n_{\text{эф}})$ и $\Delta k^* = f(n_{\text{эф}})$, $P_{\text{расч}}^* = f(n_{\text{эф}}^*)$.



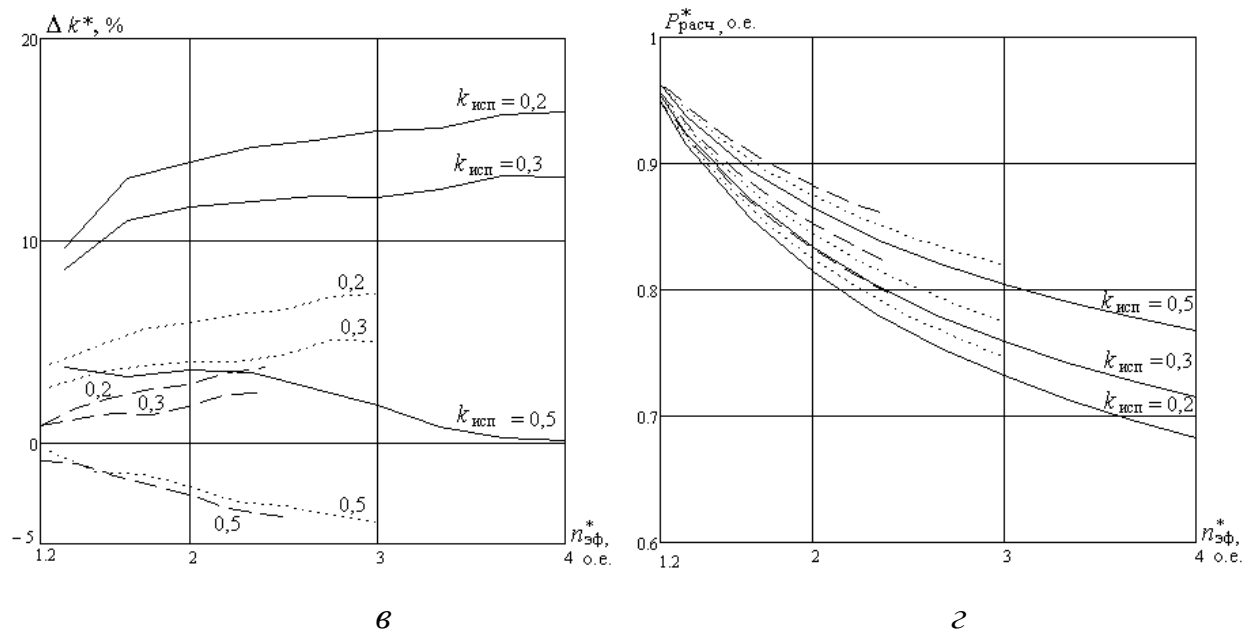


Рисунок 2.5- Зависимости: а) $k_{max} = f(n_{эф})$, б) $k_{расч} = f(n_{эф})$,

$$в) \Delta k^* = f(n_{эф}^*), з) P_{расч}^* = f(n_{эф}^*)$$

при $k_{исп} = const$, $n_{эф} \sim 3$ (—), $n_{эф} \sim 4$ (· · ·), $n_{эф} \sim 5$ (— —);

Анализ зависимостей показывает, что при существенном отличии k_{max} от $k_{расч}$ относительное значение коэффициента максимума $k_{max}^* = k_{max} / k_{расч}$ и расчетного коэффициента $k_{расч}^* = k_{расч} / k_{расч}$ имеет незначительное расхождение. При $k_{исп} = 0,5$ и $n_{эф} \sim 3$ отклонение коэффициентов ($\Delta k^* = \left(\frac{k_{max}^* - k_{расч}^*}{k_{max}^*} \right) \cdot 100\%$ (рисунок 2.5 в) составляет менее 5 % и снижается до нуля при увеличении $n_{эф}^*$. Для $n_{эф} \sim 4 \div 5$ и $k_{исп} = 0,3 \div 0,5$ Δk^* менее 5 %, причем при $k_{исп} = 0,2 \div 0,3$ имеет положительное значение, а при $k_{исп} = 0,5$ — отрицательное. Для $n_{эф} \sim 3$ Δk^* в зависимости от $k_{исп} = 0,2 \div 0,3$ находится в диапазоне $16 \div 12$ %. Поэтому использование аналитического метода расчета относительного коэффициента максимальной нагрузки для малых значений $n_{эф} \sim < 3$ и $k_{исп} < 0,3$ используется как предварительный результат. Для более точных расчетов необходимо использовать зависимости отклонений коэффициентов, рисунок 2.5 в, или использовать отношение расчетных коэффициентов.

Применяя аппроксимацию для зависимости Δk^* в виде: $\Delta k^* = 0,9 - 0,01 \cdot n_{\text{эф}}^*$ при $n_{\text{эф}\sim} = 3$ и $k_{\text{исп}} = 0,2 \div 0,3$ возможно использовать аналитическое выражение для определения $k_{\text{расч}}^*$:

$$k_{\text{расч}}^* = k_{\text{max}}^* \cdot \Delta k^* \quad (2.10)$$

При этом погрешность составляет не более 2,5%.

Полученное выражение (2.9) позволяет сделать вывод, что при $n_{\text{эф}}^* = 4$ имеется возможность уменьшения расчетной мощности трансформатора СЭК с ЧРП на постоянном токе на 32% при $k_{\text{исп}} = 0,2$ и на 23% $k_{\text{исп}} = 0,5$, при использовании метода упорядоченных диаграмм. При использовании расчетного метода уменьшение расчетной мощности трансформатора соответственно на 43% и 23% по сравнению с переменным током за счет уменьшения величины коэффициента максимума. Минимально возможная экономия (7 %) наблюдается при $n_{\text{эф}}^* = 1,2$, $P_{\text{расч}}^* = 0,93$.

2.3 Оценка сечений шин и троллейных линий по условию нагрева

Для оценки экономии материала токопроводов СЭК с ЧРП постоянного тока по сравнению с переменным током по условию нагрева оценим значения расчетных токов.

Значение расчетного тока СЭК переменного или постоянного тока [52]:

$$I_{\text{расч}\sim} = \frac{P_{\text{расч}\sim}}{\sqrt{3} \cdot \lambda \cdot U_{\text{ном}\sim}} ; I_{\text{расч}-} = \frac{P_{\text{расч}-}}{U_{\text{ном}-}}; \quad (2.11)$$

где $U_{\text{ном}-} = 513 = 1,35 \cdot U_{\text{ном}\sim}$, $U_{\text{ном}\sim} = 380$ В;

λ – коэффициент мощности.

Современные ПЧ с мостовыми трехфазными выпрямителями, как правило, содержат емкостный фильтр, что приводит к снижению входного коэффициента мощности. Для крановых установок с ЧРП и емкостным

фильтром, работающих в ПКР, входной коэффициент мощности $\lambda = 0,5 \div 0,6$ [19]. Для обеспечения ЭМС ПЧ с питающей сетью путем подключения реактора и ФКУ входной коэффициент мощности возрастает и может достичь единицы. Поэтому сравнительный анализ выполнено при $\lambda = 0,5 \div 1$.

Полагая, в первом приближении, что расчетный ток имеет синусоидальную форму, численное значение коэффициента мощности $\cos \varphi = \cos \varphi_1 \cdot \nu \approx \lambda$.

Относительный коэффициент расчетных токов с учетом (2.9) и (2.11) :

$$I_{\text{расч}}^* = \frac{I_{\text{расч-}}}{I_{\text{расч-}}} = 1,28 \cos \varphi \frac{(\sqrt{k_{\text{исп}} n_{\text{эф-}}} + 1,5\sqrt{1-k_{\text{исп}}})}{\sqrt{n_{\text{эф}}^*}(\sqrt{k_{\text{исп}} n_{\text{эф-}}} + 1,5\sqrt{1-k_{\text{исп}}})} \quad (2.12)$$

Относительный коэффициент сечений токоведущего материала по условию нагрева допустимым током определяем из соотношения:

$$S^* = \frac{S_-}{S_{\sim}} = \frac{I_{\text{расч-}} j_{\sim}}{I_{\text{расч-}} j_-} \quad (2.13)$$

где $j_{\sim}, j_-$ — допустимая плотность тока по нагреву токоведущего материала, соответственно, для переменного и постоянного тока, А/мм^2 .

В первой главе показано, что для системы питания на постоянном токе характерна более высокая допустимая плотность тока по нагреву токоведущего материала (j) в абсолютных единицах (таблица 1.1). Обозначим относительную плотность тока шин или троллейных линий $j_{\text{ш(т)}}^* = j_-/j_{\sim}$. Для шин $j_{\text{ш}}^*$ изменяется в диапазоне $1,01 \div 1,1$. Причем значения $j_{\text{ш}}^* = 1,01$ характерны для шин сечением $(40 \times 4) \text{ мм}^2$; $j_{\text{ш}}^* = 1,1$ для шин - $(120 \times 10) \text{ мм}^2$. Для троллейной линии (сталь) $j_{\text{т}}^* = 1,46 \div 2,2$. Значения $j_{\text{т}}^* = 1,46$ характерны для стального уголка №3, размером $(30 \times 30 \times 4) \text{ мм}$. Значения $j_{\text{т}}^* = 2$ и $j_{\text{т}}^* = 2,2$ для швеллера № 10 и швеллера № 14 [52, 94]. Таким образом, выражение (2.13) преобразуется к виду: $S_{\text{ш(т)}}^* = I_{\text{расч}}^* / j_{\text{ш(т)}}^*$.

Относительный коэффициент сечений шин и троллейных линий с учетом выражения (2.12) и (2.13) имеет вид :

$$S_{ш(т)}^* = \frac{S_{ш(т)}}{S_{ш(т)\sim}} = \frac{1.28 \cos \varphi}{j_{ш(т)}^*} \cdot \frac{(\sqrt{k_{исп} n_{эф}} + 1,5\sqrt{1-k_{исп}})}{\sqrt{n_{эф}^*} \cdot (\sqrt{k_{исп} n_{эф}} + 1,5\sqrt{1-k_{исп}})} \quad (2.14)$$

Зависимости относительного коэффициента сечений шин и троллейных линий представлены на рисунке 2.6 при $\cos \varphi = 0,5$ и $\cos \varphi = 1$.

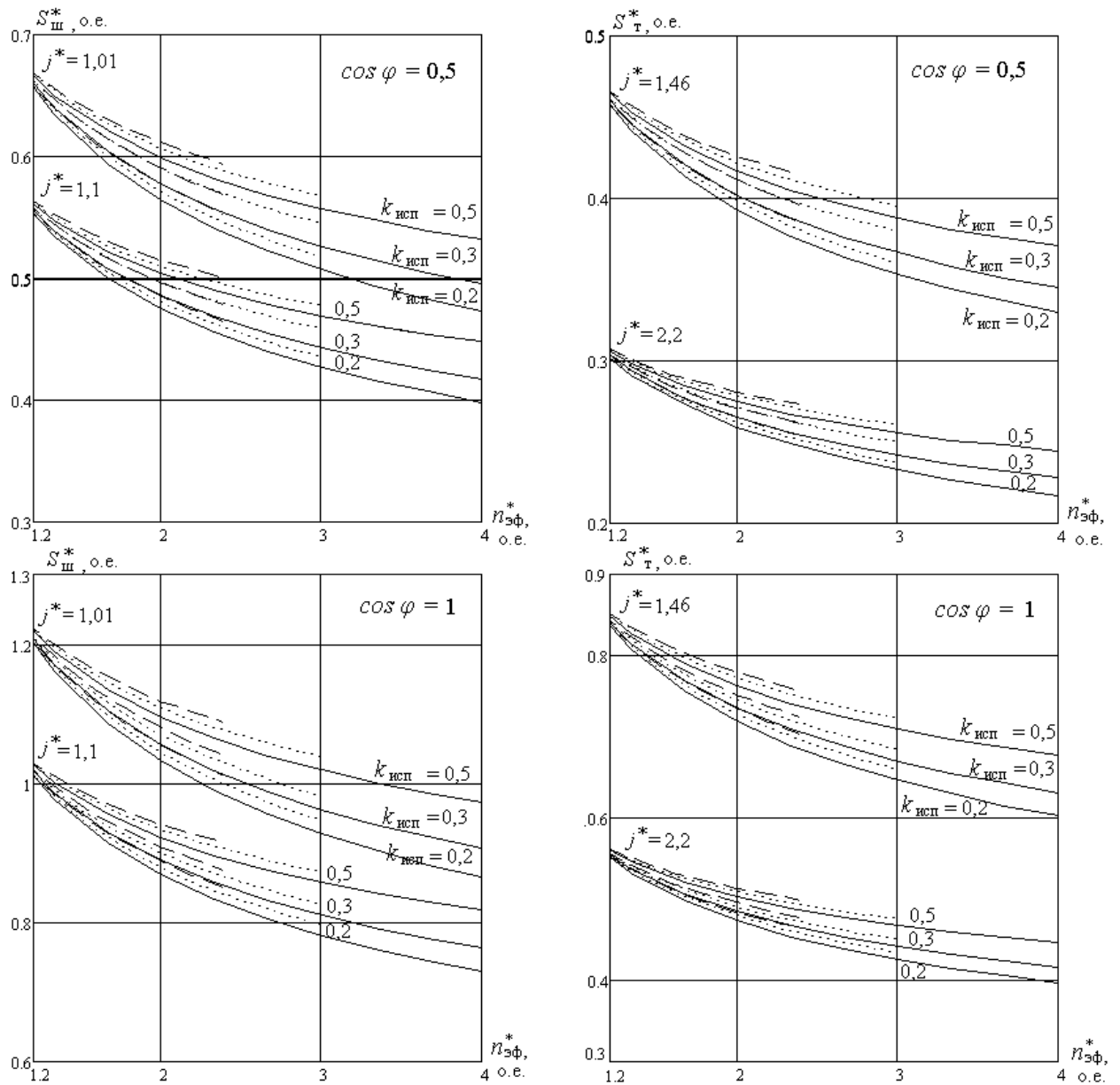


Рисунок 2.6 – Зависимости относительного коэффициента сечений шин и

троллейных линий $S_{ш(т)}^* = f(n_{эф}^*)$

$k_{исп} = const, n_{эф} \sim 3 (-), n_{эф} \sim 4 (\cdot \cdot \cdot), n_{эф} \sim 5 (- -)$

Как видно из рисунка 2.6, значение относительного коэффициента сечений шин и троллейных линий $S_{ш(т)}^*$ уменьшается с увеличением ЭП постоянного тока. Максимальная экономия токоведущего материала наблюдается при $\cos \varphi = 0,5$ для шин и троллейных линий большего сечения, соответственно, $j_{ш}^* = 1,1$ и $j_{т}^* = 2,2$.

Используя выражение (2.14), получено выражение для определения $\cos \varphi$, при котором значение относительного коэффициента сечений шин $S_{ш}^* = 1$.

$$\cos \varphi = \frac{j_{ш}^* \sqrt{n_{эф}^* (\sqrt{k_{исп} n_{эф}} + 1,5 \sqrt{1 - k_{исп}})}}{1,28 (\sqrt{k_{исп} n_{эф}} + 1,5 \sqrt{1 - k_{исп}})} \quad (2.15)$$

Значение $\cos \varphi$ уменьшается при использовании минимальных сечений шин ($j_{ш}^* = 1,01$), а при использовании максимальных сечений ($j_{ш}^* = 1,1$) значение $\cos \varphi$ увеличивается.

Анализ зависимостей, рисунок 2.6, позволяет сделать вывод, что при $n_{эф}^* = 4$, $\cos \varphi = 0,5$ и $k_{исп} = 0,5$ имеется возможность экономии проводникового материала за счет уменьшения сечения шин на $46,8 \div 55,2$ %, соответственно, при $j_{ш}^* = 1,01 \div 1,1$, и троллейных линий на $62,9 \div 75,6$ %, соответственно, при $j_{т}^* = 1,46 \div 2,2$. При уменьшении коэффициента использования до $k_{исп} = 0,2$ уменьшение сечения шин происходит на $52,7 \div 60,2$ %, при $j_{ш}^* = 1,01 \div 1,1$, и троллейных линий на $67 \div 78,3$ %, при $j_{т}^* = 1,46 \div 2,2$.

При $n_{эф}^* = 4$, $\cos \varphi = 1$ и $k_{исп} = 0,5$ уменьшение сечения шин происходит на $3 \div 18$ %, соответственно, при $j_{ш}^* = 1,01 \div 1,1$ и троллейных линий на $33,2 \div 55,3$ %, соответственно, при $j_{т}^* = 1,46 \div 2,2$. При уменьшении коэффициента использования до $k_{исп} = 0,2$ уменьшение сечения шин происходит на $13,4 \div 27,1$ %, при $j_{ш}^* = 1,01 \div 1,1$, и троллейных линий на $40 \div 60$ %, при $j_{т}^* = 1,46 \div 2,2$.

Сравнение значений относительного коэффициента сечений $S_{ш(т)}^*$ показывает значительное уменьшение сечения троллейной линии СЭК постоянного тока за счет увеличения относительной плотности тока

троллейной линии j_T^* по сравнению с шиной $j_{ш}^*$, при одинаковом значении $n_{эф}^*$. Максимальное уменьшение относительного коэффициента сечений $S_{ш(т)}^*$ наблюдается при использовании шин или троллейных линий больших сечений за счет увеличения относительной плотности тока $j_{ш(т)}^*$. Указанное обстоятельство связано с увеличением поверхностного эффекта для шин или троллейных линий переменного тока. При увеличении количества кранов, подключенных к шинам либо троллейным линиям постоянного тока, преимущества СЭК постоянного тока возрастают.

Таким образом, реализация СЭК на постоянном токе приводит к существенной экономии материала за счет уменьшения сечения проводникового материала при обеспечении допустимой температуры по нагреву.

2.4 Оценка потери напряжения в шинах и троллейных линиях

Проверка выбранного сечения шин или троллейных линий осуществляется по величине потери напряжения в самой удаленной точке. Для шин или троллейных линий, питающих крановые установки, существуют жесткие требования по допустимой потере напряжения[52]:

- 5% для переменного тока;
- 4% для постоянного тока.

Потеря напряжения на шине или троллейной линии переменного тока на основной гармонике определяется соотношением [95],%:

$$\Delta U_{ш,(т)~} = \frac{\sqrt{3} I_{пик~} (R_{ш,(т)} \cos \varphi + X_{ш,(т)} \sin \varphi)}{U_{ном~}} \cdot 100 \quad (2.16)$$

где $R_{ш,(т)}$, $X_{ш,(т)}$ – активное, индуктивное сопротивления шины или троллейной линии, Ом.

φ – угол сдвига между током и напряжением.

Оценочный расчет потери напряжения был произведен при допущении,

что численное значение $\cos \varphi = \cos \varphi_1 \cdot \nu \approx \lambda$. Учет влияния высших гармоник будет проведен в главе 3.

Полагая, что $X_{ш,(т)} = R_{ш,(т)} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{ш,(т)}$, потеря напряжения на шине или троллейной линии переменного тока в преобразованном виде:

$$\Delta U_{ш,(т)~} = \frac{\sqrt{3} I_{\text{пик}} R_{ш,(т)} (\cos \varphi + \operatorname{tg} \varphi_{ш,(т)} \sin \varphi)}{U_{\text{ном}~}} \cdot 100 \quad (2.17)$$

Потеря напряжения на шине, троллейной линии постоянного тока [94]:

$$\Delta U_{ш,(т)-} = \frac{2 I_{\text{пик}} R_{ш,(т)}}{U_{\text{ном}-}} \cdot 100 \quad (2.18)$$

Пиковое значение тока в СЭК на постоянном токе определяется активной составляющей тока АД при частотном пуске.

Учитывая, что

$$R_{ш,(т)} = \rho_0 \frac{l}{S} = \frac{l}{KS}, \quad (2.19)$$

где ρ_0 – удельное электрическое сопротивление, Ом·мм²/м;

K – удельная проводимость, для алюминия на переменном и постоянном токе: $K_{\sim} = 35,7$ м/Ом·мм² и $K_{-} = 36,5$ м/Ом·мм² для стали – соответственно: $K_{\sim} = 4$ м/Ом·мм² и $K_{-} = 10$ м/Ом·мм² [52];

S, l – сечение и длина шины или троллейной линии, мм² и м.

Потеря напряжения на шине или троллейной линии переменного и постоянного тока с учетом (2.19) имеет вид:

$$\Delta U_{ш,(т)~} = \frac{\sqrt{3} I_{\text{пик}} l \cdot 100}{K_{\sim} S_{ш,(т)~} \cdot U_{\text{ном}~}} (\cos \varphi + \operatorname{tg} \varphi_{ш,т} \sin \varphi) \quad (2.20)$$

$$\Delta U_{ш,(т)-} = \frac{2 I_{\text{пик}} l \cdot 100}{K_{-} S_{ш,(т)-} \cdot U_{\text{ном}-}} \quad (2.21)$$

Принимая во внимание, что пиковый ток ($I_{\text{пик}}$) определяется [52]:

$$I_{\text{пик}} = (k_{\text{п}} - 1)I_{\text{ном max}} + I_{\text{расч}} = k_{\text{пик}}I_{\text{расч}} \quad (2.22)$$

где $k_{\text{пик}}$ – коэффициент увеличения расчетного тока в момент пуска.

Следует обратить внимание, что в ЧРП при пуске ток изменяется от нуля до максимального значения, которое достигается в конце пуска и имеет меньшую длительность по сравнению с пуском асинхронного двигателя при релейно-контакторном управлении.

В дальнейшем кратность пикового тока будем считать одинаковой и $k_{\text{пик}} \approx 1,2$ для СЭК переменного и постоянного тока.

Графическая интерпретация потери напряжения на шинах, троллейных линиях переменного и постоянного тока из выражения (2.20), (2.21) представлена в приложении Г: рис. Г.1, рис. Г.2, рис. Г.3. Как видно из представленных рисунков, значения граничной длины шин или троллейной линии имеют большие значения для СЭК постоянного тока по сравнению с переменным током при равнозначном используемом сечении.

Учитывая, что нормативные значения потери напряжения для постоянного тока и переменного тока равняются соответственно 4 % и 5%, численное значение относительного коэффициента потери постоянного к переменному напряжению ($2/\sqrt{3} \cdot 1,35$) равняется 0,85, значение отношения потери напряжения имеет вид:

$$\Delta U^*_{\text{ш,(т)}} = \frac{\Delta U_{\text{ш,(т)}-}}{\Delta U_{\text{ш,(т)}\sim}} = 0,8 = \frac{0,85 \cdot I_{\text{расч-}} K_{\sim} \cdot S_{\text{ш(т)}\sim} \cdot l_{\text{гр-}}}{I_{\text{расч}\sim} K_{-} \cdot S_{\text{ш(т)}-} \cdot l_{\text{гр}\sim} (\cos \varphi + \operatorname{tg} \varphi_{\text{ш,(т)}} \cdot \sin \varphi)} \quad (2.23)$$

Обозначим $K^* = K_{-}/K_{\sim}$ – отношение удельных проводимостей, $l_{\text{гр}}^* = l_{\text{гр-}}/l_{\text{гр}\sim}$ – отношение граничных длин, $S_{\text{ш(т)}}^* = S_{\text{ш(т)}-}/S_{\text{ш(т)}\sim}$ – отношение сечений шин или троллейных линий.

Выражение (2.23) позволяет определить отношение длин шин или троллейных линий при равном сечении $S_{ш(т)}^* = 1$ и отношение сечений шин или троллейных линий при равной длине $l_{гр}^* = 1$.

Выразив $I_{расч}^* = I_{расч-} / I_{расч~}$ выражение (2.23) преобразуется к виду:

$$0,94 = \frac{I_{расч}^* \cdot l_{гр}^*}{S_{ш(т)}^* \cdot K^* \cdot (\cos \varphi + tg \varphi_{ш(т)} \cdot \sin \varphi)} \quad (2.24)$$

Относительный коэффициент граничных длин шин или троллейных линий постоянного к переменному току из выражения (2.24) при $S_{ш(т)}^* = 1$ с учетом выражение $S_{ш(т)}^* = I_{расч}^* / j_{ш(т)}^*$ имеет вид:

$$l_{гр}^* = \frac{l_{гр-}}{l_{гр~}} = \frac{0,94 \cdot K^* \cdot (\cos \varphi + tg \varphi_{ш(т)} \cdot \sin \varphi)}{j_{ш(т)}^*} \quad (2.25)$$

Численные значения параметров сечений шин и троллейных линий приведены в приложении В: таблица В. 1 , таблица В. 2.

Величина длины, в зависимости от применяемых на практике шин, уголков на постоянном и переменном токе, в относительных единицах ограничивается значениями, которые представлены в приложение Д: рис. Д.1, рис. Д. 2, рис. Д.3. Анализ указанных зависимостей показывает, что увеличение сечения позволяет увеличить длину рабочего участка шин, уголков для переменного тока и постоянного тока.

Исследования проводились на примере открыто проложенных шин переменного ($\cos \varphi = 0,5$) и постоянного тока ≤ 1000 А, сечением (40×5) мм², (50×6) мм², (60×8) мм² и шин > 1000 А, сечением (80×8) мм², (80×10) мм² и (100×10) мм². Для троллейных линий переменного и постоянного тока – на примере угловой стали размерами: $(30 \times 30 \times 4)$ мм; $(50 \times 50 \times 5)$ мм; $(60 \times 60 \times 8)$ мм.

Численные значения параметров сечений шин и троллейных линий $tg \varphi_{ш,т}$,

j^* для рассматриваемых сечений представлены на рисунке 2.7. За условную единицу принято сечение наиболее применяемой шины $40 \times 5 = 200 \text{ мм}^2$.

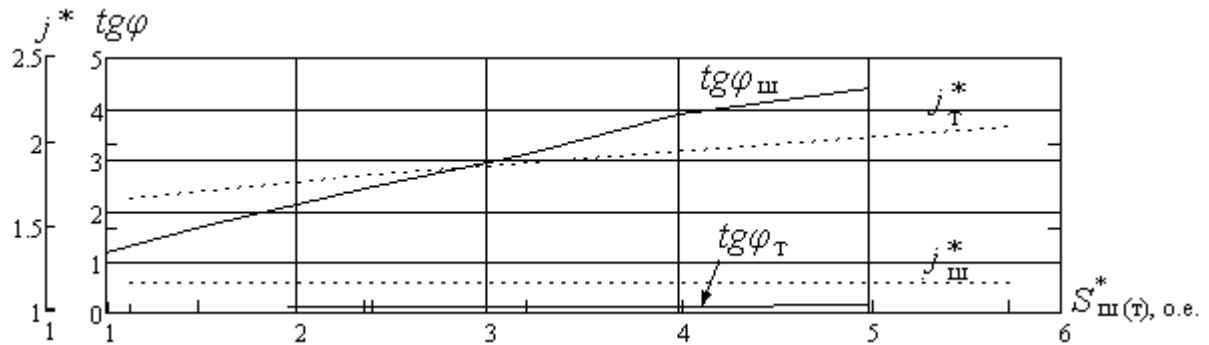


Рисунок 2.7 – Зависимость значения $tg\varphi_{ш,т}, j_{ш,т}^* = f(S_{ш(т)}^*)$

При увеличении сечения шин значение $tg\varphi_{ш}$ изменяется в диапазоне $1,2 \div 4,4$, что вызвано увеличением индуктивности шин при увеличении сечения шины и изменении размеров сторон. Значение $tg\varphi_{т}$ для угловой стали имеет практически постоянное значение, равное 0,58. Индуктивность троллейных линий слабо зависит от периметра сечения, а определяется в основном значением магнитной проницаемости стального уголка μ . Для постоянного и переменного тока относительная плотность тока (j^*) изменяется в диапазоне: для шин $j_{ш}^* = 1,01 \div 1,05$, для троллейных линий выполненных угловой сталью $j_{т}^* = 1,67 \div 2,1$, рисунок 2.7.

Сравнительный анализ параметров для рассматриваемых сечений шин и троллейных линий СЭК с ЧРП приведен соответственно в таблице 2.1 и 2.2.

При увеличении сечения удельная потеря напряжения для шин постоянного тока снижается на большую величину, чем для шин переменного тока, так как в последнем случае при увеличении сечения снижается только активное сопротивление, а индуктивное возрастает. В связи с этим для шин постоянного тока граничная длина по условию допустимой потери напряжения больше, чем для шин переменного тока. Аналогичная ситуация наблюдается при использовании троллейных линий (таблица 2.2).

Таблица 2.1 – Сравнительный анализ параметров шин СЭК с ЧРП

Шина Параметр		Менее или равняется 1000 А		Более 1000 А	
1	$I_{\text{НОМ-}}/I_{\text{НОМ~}}, \text{А}$	Сечение (40×5), мм ²	545/540	Сечение (80×8), мм ²	1355/1320
	$j^* = j_-/j_+, \text{о.е.}$		1,01 = 2,75/2,7		1,034 = 2,11/2,06
	$\text{tg } \varphi_{\text{ш}}$		1,2/-		3,1/-
	$l_{\text{гр}}^* = l_{\text{гр-}}/l_{\text{гр~}}, \text{о.е.}$		1,46 = 112,4/77		2,99 = 152,5/51
2	$I_{\text{НОМ-}}/I_{\text{НОМ~}}, \text{А}$	Сечение (50×6), мм ²	745/740	Сечение (80×10), мм ²	1540/1480
	$j^* = j_-/j_+, \text{о.е.}$		1,02 = 2,45/2,4		1,04 = 1,93/1,85
	$\text{tg } \varphi_{\text{ш}}$		1,7/-		3,9/-
	$l_{\text{гр}}^* = l_{\text{гр-}}/l_{\text{гр~}}, \text{о.е.}$		1,86 = 128,3/69		3,58 = 157,5/44
3	$I_{\text{НОМ-}}/I_{\text{НОМ~}}, \text{А}$	Сечение (60×8), мм ²	1040/1025	Сечение (100×10), мм ²	1910/1820
	$j^* = j_-/j_+, \text{о.е.}$		1,03 = 2,19/2,13		1,05 = 1,91/1,82
	$\text{tg } \varphi_{\text{ш}}$		2,5/-		4,4/-
	$l_{\text{гр}}^* = l_{\text{гр-}}/l_{\text{гр~}}, \text{о.е.}$		2,5 = 142,5/57		3,98 = 167,2/42

Таблица 2.2 – Сравнительный анализ параметров угловой стали СЭК с ЧРП

Угловая сталь Параметр	30×30×4 мм	50×50×5 мм	60×60×8 мм
$I_{\text{НОМ-}}/I_{\text{НОМ~}}, \text{А}$	305/185	565/315	840/410
$j^* = j_-/j_+, \text{о.е.}$	1,67 = 1,34/0,8	1,82 = 1,18/0,65	2,1 = 0,93/0,45
$\text{tg } \varphi_{\text{т}}$	0,58	0,58	0,58
$l_{\text{гр}}^* = l_{\text{гр-}}/l_{\text{гр~}}, \text{о.е.}$	1,41 = 64,2 /45,6	1,3 = 73,4 /56,5	1,2 = 91,8/76,5

Увеличение граничной длины троллейных линий постоянного тока связано с уменьшением их активного сопротивления для постоянного тока в большей степени, чем переменного.

Значения относительного коэффициента, вычисленного из выражения (2.25), представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Значения относительного коэффициента граничных длин шин и троллейных линий $l_{гр}^* = f(j_{ш(т)}^*, \cos \varphi)$

$j_{ш}^*$	$\begin{matrix} \cos \varphi \\ \hline \text{tg} \varphi_{ш} \end{matrix}$	0,5	0,7	1	$j_{т}^*$	$\begin{matrix} \cos \varphi \\ \hline \text{tg} \varphi_{т} \end{matrix}$	0,5	0,9	1
1,01	0,96	1,27	1,32	0,95	1,46	0,58	1,613	1,9	1,61
1,1	4,6	4,3	3,5	0,9	2,2	0,58	1,071	1,23	1,068

Для шин наблюдается увеличение значения $l_{гр}^*$ в диапазоне $1,27 \div 4,3$ при $\cos \varphi = 0,5$, соответственно, при использовании шин минимальных сечений ($j_{ш}^* = 1,01$) и при использовании шин максимальных сечений ($j_{ш}^* = 1,1$). При $\cos \varphi = 1$ наблюдается уменьшение значения $l_{гр}^*$ в диапазоне $0,95 \div 0,9$ в зависимости от используемых сечений шин за счет увеличения значения выпрямленного тока в 1,28 раза по сравнению со значением фазного тока.

Для троллейных линий минимальных сечений ($j_{т}^* = 1,46$) наблюдается увеличение значения $l_{гр}^*$ до $\approx 1,61$ при $\cos \varphi = 0,5$ и $\cos \varphi = 1$. Для троллейных линий максимальных сечений ($j_{т}^* = 2,2$) наблюдается увеличение значения $l_{гр}^*$ до $\approx 1,071$ при $\cos \varphi = 0,5$ и $\cos \varphi = 1$.

При $\cos \varphi = 0,5$ и $\cos \varphi = 1$ $l_{гр}^*$ принимает одинаковые значения, что объясняется $\text{tg} \varphi_{т} \cdot \sin \varphi = 0,58 \cdot 0,866 \approx 0,5$, тогда выражение $(\cos \varphi + \text{tg} \varphi_{т} \cdot \sin \varphi)$ приобретает значение равное 1 при $\cos \varphi = 0,5$ и $\cos \varphi = 1$.

На рисунке 2.8 (а, б) построены зависимости $l_{гр}^* = f(\cos \varphi)$ соответственно для шин и троллейных линий при $j_{ш(т)}^* = \text{const}$.

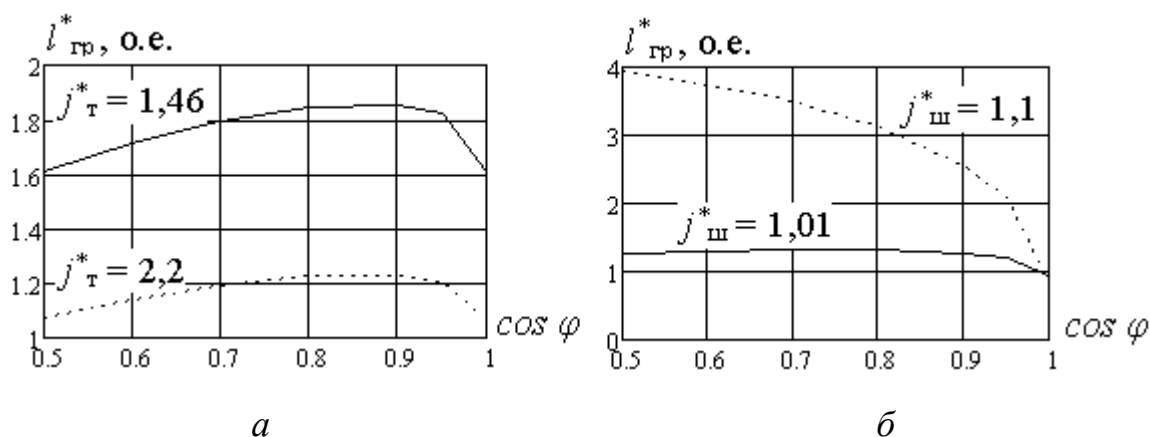


Рисунок 2.8 – Зависимости относительного коэффициента граничных длин троллейных линий (а) и шин (б) $l_{гр}^* = f(\cos \varphi)$ при $j_{ш(т)}^* = const$.

При сравнительном анализе относительного коэффициента граничных длин $l_{гр}^*$ по условию допустимой потери напряжения установлено, что его величина при частоте 50 Гц определяются в основном произведением $\operatorname{tg} \varphi_{ш(т)} \cdot \sin \varphi$, входящим в функцию $f(\varphi) = (\cos \varphi + \operatorname{tg} \varphi_{ш(т)} \cdot \sin \varphi)$. Расчетные значения функции $f(\varphi) = (\cos \varphi + \operatorname{tg} \varphi_{ш(т)} \cdot \sin \varphi)$ при использовании троллейных линий и шин на частоте 50 Гц и более представлены в таблице 2.4, а ее зависимости показаны на рисунке 2.9.

Таблица 2.4 – Расчетные значения $f(\varphi) = (\cos \varphi + \operatorname{tg} \varphi_{ш(т)} \cdot \sin \varphi)$

$\cos \varphi \backslash \operatorname{tg} \varphi_{ш(т)}$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
0,58	1	1,064	1,114	1,148	1,153	1,0
0,96	1,331	1,368	1,385	1,376	1,319	1,0
1,7	1,972	1,96	1,914	1,82	1,641	1,0
4,6	4,484	4,28	3,984	3,56	2,906	1,0
10	9,16	8,6	7,84	6,8	5,26	1,0
15	13,49	12,6	11,41	9,8	7,44	1,0
20	17,82	16,6	14,98	12,8	9,62	1,0

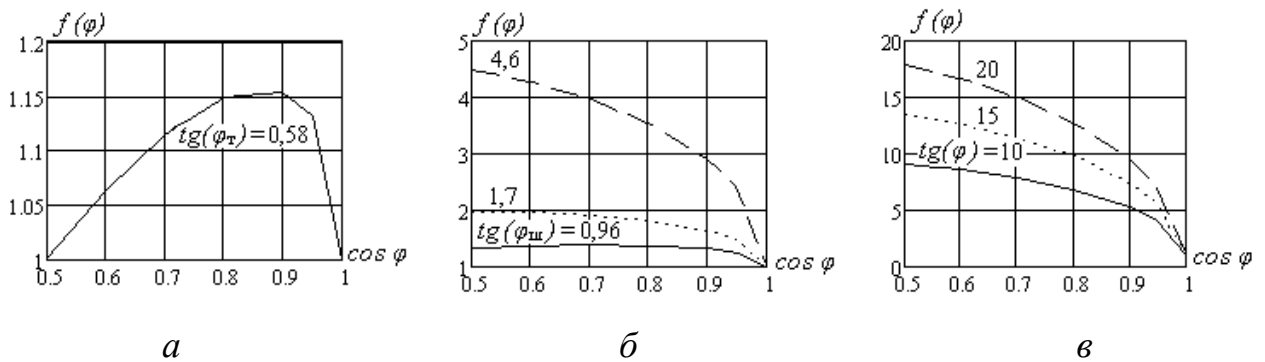


Рисунок 2.9 – Зависимости функции $f(\varphi) = (\cos \varphi + \operatorname{tg} \varphi_{\text{ш},(\text{т})} \cdot \sin \varphi)$

а) для троллейных линий; б) для шин; в) для токопроводов на частоте более 50 Гц

Для частоты 50 Гц $\operatorname{tg} \varphi_{\text{ш},(\text{т})}$ принимает значения от $0,58 \div 4,6$ при использовании, соответственно, троллейных линий и шин. Анализ зависимостей показывает, что для троллейных линий функции имеет максимум при $\cos \varphi \approx 0,9$. Для значений $\operatorname{tg} \varphi \geq 1,7$ функция монотонно возрастает при уменьшении $\cos \varphi$. Минимальное значение равно 1 функция $f(\varphi)$ принимает при $\cos \varphi = 1$.

Как видно из рисунка 2.8, зависимости относительного коэффициента граничных длин для шин и троллейных линий имеют различный характер. Для шин значение $l_{\text{гр}}^*$ определяется $j_{\text{ш}}^*$, которое для различных токов имеет значения 1,01 и 1,1, а также существенным различием $\operatorname{tg} \varphi_{\text{ш}}$, которое изменяется в диапазоне $0,96 \div 4,6$. Разные значения $\operatorname{tg} \varphi_{\text{ш}}$ определяют характер изменения зависимости $l_{\text{гр}}^* = f(\cos \varphi)$ шин при $j_{\text{ш}}^* = \text{const}$. Для троллейных линий значение $\operatorname{tg} \varphi_{\text{т}}$ практически неизменно, поэтому характер изменения $l_{\text{гр}}^* = f(\cos \varphi)$ для различных $j_{\text{т}}^*$ одинаковый. Максимум значения $l_{\text{гр}}^*$ наблюдается при $\cos \varphi = 0,9$.

Относительный коэффициент сечений шин или троллейных линий из выражения (2.24) при $l_{\text{гр}}^* = 1$ имеет вид:

$$S_{\text{ш}(\text{т})}^* = \frac{S_{\text{ш},(\text{т})}}{S_{\text{ш},(\text{т})\sim}} = \frac{1,06 \cdot I_{\text{расч}}^*}{(\cos \varphi + \operatorname{tg} \varphi_{\text{ш},(\text{т})} \cdot \sin \varphi) \cdot K^*} \quad (2.26)$$

Относительный коэффициент сечений шин или троллейных линий с учетом выражения (2.12) преобразуется к виду :

$$S_{ш(т)}^* = \frac{S_{ш(т)} -}{S_{ш(т)} \sim} = \frac{1,36 \cdot \cos \varphi \cdot P_{расч}^*}{(\cos \varphi + \operatorname{tg} \varphi_{ш(т)} \cdot \sin \varphi) \cdot K^*} \quad (2.27)$$

Значения относительного коэффициента сечений шин и троллейных линий $S_{ш(т)}^*$, вычисленных из выражения (2.27), представлены в таблице 2.5, принимая наиболее худший вариант с экономической точки зрения ($P_{расч}^* = 0,93$, рисунок 2.5 (з), при $n_{эф}^* = 1,2$; $k_{исп} = 0,2 \div 0,5$). На рисунке 2.10 представлены зависимости $S_{ш(т)}^* = f(\cos \varphi)$.

Таблица 2.5 – Значения относительного коэффициента сечений шин и троллейных линий $S_{ш(т)}^* = f(\cos \varphi)$

$\begin{matrix} \cos \varphi \\ \operatorname{tg} \varphi \end{matrix}$	0,5	0,7	0,8	0,95	1
0,58	0,253	0,319	0,321	0,426	0,508
0,96	0,465	0,625	0,632	0,941	1,238
4,6	0,138	0,217	0,221	0,493	1,238

Анализ результатов расчета показывает относительную экономию материала одного полюса шины на постоянном токе в диапазоне 53,5% ÷ 86,2% при $\cos \varphi = 0,5$ и 5,7% ÷ 51 % при $\cos \varphi = 0,95$ в зависимости от используемого сечения шин. При $\cos \varphi = 1$ происходит увеличение сечения одного полюса шины постоянного тока на 23,8% раза по сравнению с переменным, в связи с увеличением значения выпрямленного тока по сравнению со значением переменного тока.

Относительная экономия материала одного полюса троллейных линий составляет 75% при $\cos \varphi = 0,5$; 57,4 % - при $\cos \varphi = 0,95$; 49,2 %- при $\cos \varphi = 1$.

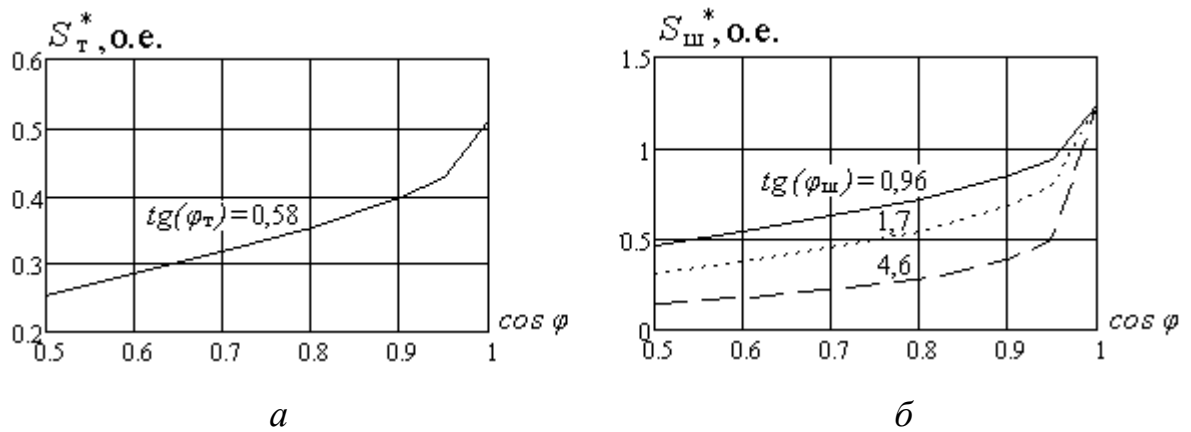


Рисунок 2.10 – Зависимости относительного коэффициента сечений троллейных линий (а) $S_T^* = f(\cos \varphi)$ и шин (б) $S_{III}^* = f(\cos \varphi)$

При сравнительном анализе относительного коэффициента сечений $S_{ш(т)}^*$ по условию допустимой потери напряжения установлено, что величина коэффициента $S_{ш(т)}^*$ при частоте питающей сети определяются в основном произведением $\text{tg} \varphi_{ш(т)} \cdot \sin \varphi$, входящим в функцию $f1(\varphi) = (\cos \varphi / (\cos \varphi + \text{tg} \varphi_{ш(т)} \cdot \sin \varphi))$. Расчетные значения функции $f1(\varphi)$ для троллейных линий и шин на частоте 50 Гц и более приведены в таблице 2.6. Зависимость функции $f1(\varphi)$ приведена на рисунке 2.11.

Таблица 2.6 – Расчетные значения $f1(\varphi) = \left(\frac{\cos \varphi}{\cos \varphi + \text{tg} \varphi_{ш(т)} \cdot \sin \varphi} \right)$

$\cos \varphi \backslash \text{tg} \varphi_{ш(т)}$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
0,58	0,499	0,564	0,628	0,697	0,781	1
0,96	0,376	0,439	0,505	0,581	0,683	1
1,7	0,254	0,306	0,366	0,44	0,548	1
4,6	0,112	0,14	0,176	0,225	0,31	1
10	0,055	0,07	0,089	0,118	0,171	1
15	0,037	0,048	0,061	0,082	0,121	1
20	0,028	0,036	0,047	0,063	0,094	1

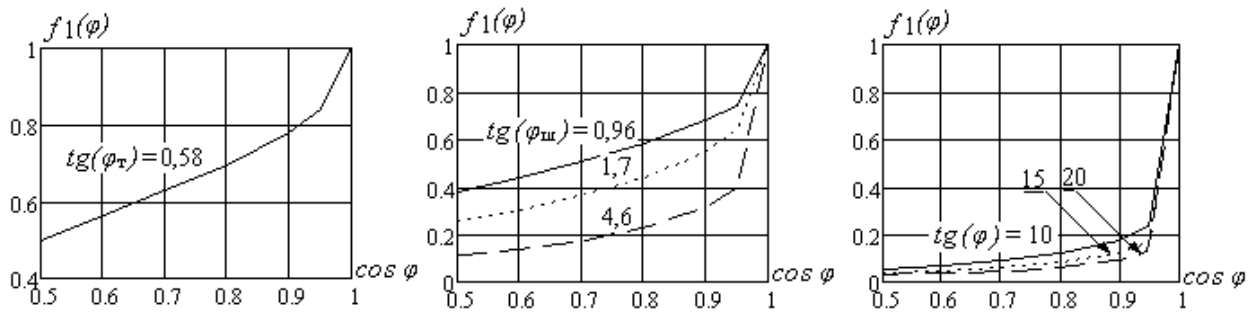


Рисунок 2.11 – Зависимости функции $f1(\varphi)$

а) для троллейных линий; б) для шин; в) для токопроводов на частоте более 50 Гц

Коэффициент $S_{ш(т)}^*$ обратно пропорционален выражению $(\cos \varphi / (\cos \varphi + \operatorname{tg} \varphi_{ш(т)} \cdot \sin \varphi))$, поэтому с увеличением $\operatorname{tg} \varphi$, что характерно при использовании шин более 1000 А или при циркуляции по токопроводу гармоник высоких порядков соотношение их сечений существенно уменьшается, что говорит о целесообразности использования постоянного тока в СЭК с ЧРП.

2.5 Оценка потерь мощности в шинах и троллейных линиях

Потери мощности в шинах и троллейных линиях постоянного и переменного тока определяются соотношением [95]:

$$\Delta P_{ш(т)-} = 2(I_{\text{расч.ш,т-}})^2 R_{-}; \quad \Delta P_{ш(т)\sim} = 3(I_{\text{расч.ш,т}\sim})^2 R_{\sim} \quad (2.28)$$

Зависимость удельных потерь мощности в шинах и троллейных линиях $(\Delta P_{ш(т)\sim})$ переменного тока для рассматриваемых сечений представлена, соответственно, на рисунках 2.12 (а, б) и 2.13. Значение расчетного тока находится в диапазоне $I_{\text{расч.}} = (0,06 \div 1) I_{\text{дл.доп.}}$, $\cos \varphi = 0,5$.

Из графиков (рисунки 2.12 и 2.13) видно, что потери мощности в троллейных линиях переменного тока, представленных уголком $60 \times 60 \times 8$ мм в 7 раз больше по сравнению с шиной сечением 40×5 мм² при протекании тока 400 А за счет большего сопротивления троллейных линий.

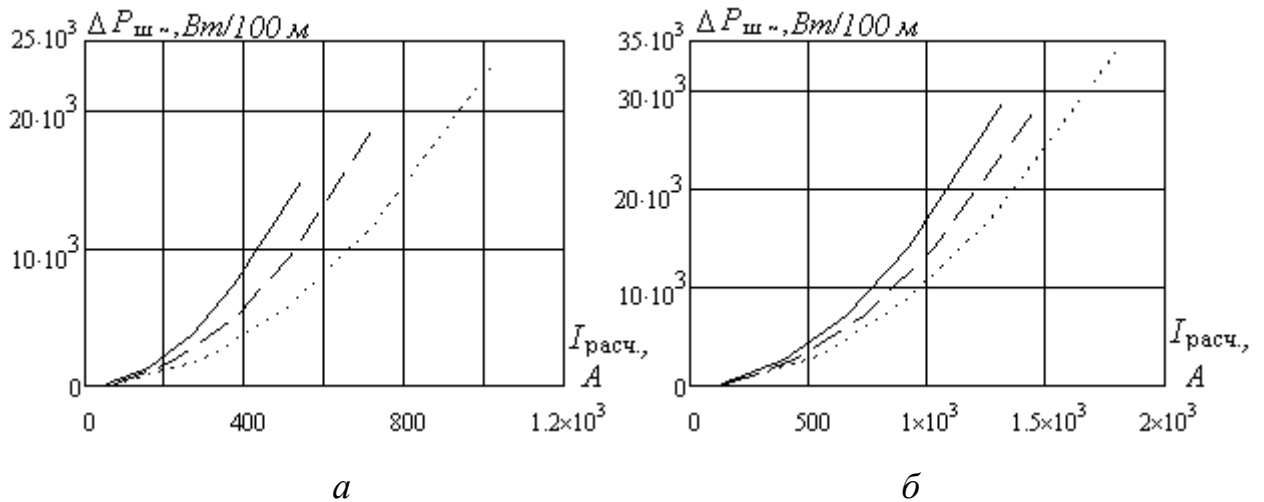


Рисунок 2.12 – Зависимости удельных потерь мощности в шинах

переменного тока $\Delta P_{ш\sim} = f(I_{расч.})$, сечением $S_{ш}$

а: (—) - $S_{ш} = 40 \times 5 \text{ мм}^2$; (---) - $S_{ш} = 50 \times 6 \text{ мм}^2$; (···) - $S_{ш} = 60 \times 8 \text{ мм}^2$;

б: (—) - $S_{ш} = 80 \times 8 \text{ мм}^2$; (---) - $S_{ш} = 80 \times 10 \text{ мм}^2$; (···) - $S_{ш} = 100 \times 10 \text{ мм}^2$

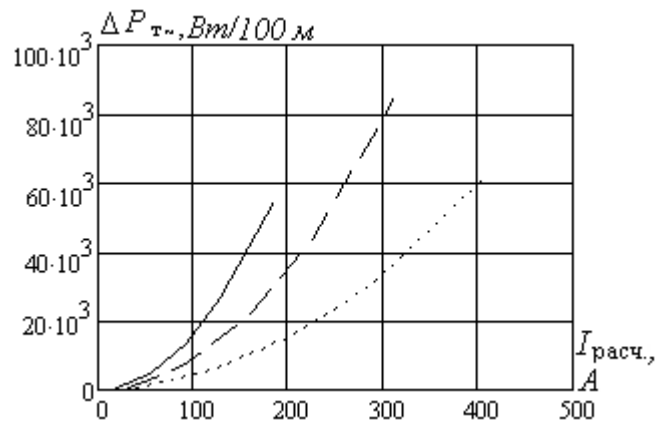


Рисунок 2.13 – Зависимости удельных потерь мощности в троллейных

линиях переменного тока $\Delta P_{т\sim} = f(I_{расч.})$, размером

(—) - $30 \times 30 \times 4 \text{ мм}$; (---) - $50 \times 50 \times 5 \text{ мм}$; (···) - $60 \times 60 \times 8 \text{ мм}$

Относительный коэффициент потерь мощности в шинах и троллейных линиях с учетом выражений (2.11, 2.19) имеет вид:

$$\Delta P_{ш,(т)}^* = \frac{\Delta P_{ш(т)-}}{\Delta P_{ш(т)\sim}} = \frac{2 \cdot (\cos \varphi)^2 \cdot P_{расч-S\sim}^2 \cdot K_{\sim} \cdot l_{\sim}}{3(1,35)^2 \cdot P_{расч\sim}^2 \cdot S_{\sim} \cdot K_{\sim} \cdot l_{\sim}} \quad (2.29)$$

Относительный коэффициент потерь мощности в шинах и троллейных линиях определяется согласно выражению, принимая $P_{\text{расч-}}/P_{\text{расч~}}=1$:

$$\Delta P^*_{\text{ш,(т)}} = 0,36 \frac{l_{\text{гр}}^*}{K^* \cdot S_{\text{ш(т)}}^*} (\cos \varphi)^2 \quad (2.30)$$

Значения относительного коэффициента мощности при равных сечениях $S_{\text{ш(т)}}^* = 1$ и длинах $l_{\text{гр}}^* = 1$ шин и троллейных линий, представлены на рисунке 2.14, $\Delta P^*_{\text{ш,(т)}} = f(\cos \varphi)$.

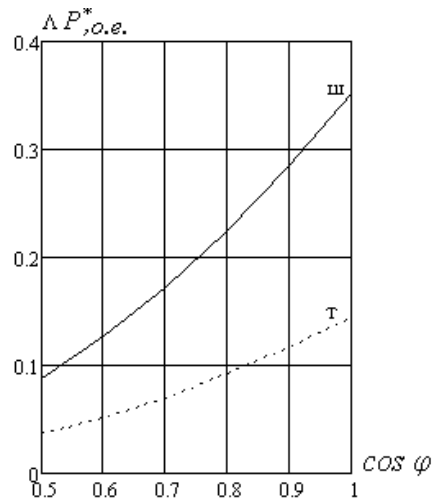


Рисунок 2.14 – Зависимости относительного коэффициента потерь мощности в шинах и троллейных линиях $\Delta P^*_{\text{ш,(т)}} = f(\cos \varphi)$

При $\cos \varphi = 0,5$ или $\cos \varphi = 1$ относительное снижение удельных потерь мощности в шинах и троллейных линиях постоянного тока по сравнению с переменным током составляет соответственно до 91 % и 94 % или до 65 % и 74 %.

2.6 Сравнительная оценка систем электропитания кранов

Сравнительная оценка СЭК с ЧРП представлена в таблице 2.7. Сравнение шин или троллейных линий постоянного и переменного тока производится путем определения относительных коэффициентов: расчетной мощности,

сечения токоведущего материала по условию нагрева, допустимой потери напряжения, потерь мощности. При этом за условную единицу приняты параметры системы переменного тока: $P_{\text{расч}}, j_{\text{ш(т)}}^*$. Расчет сечения по условию допустимой потери напряжения выполнен для 100 м участка токопровода. При выборе сечения шин (индекс $*$) переменного или постоянного тока определяющим является условие по нагреву. Количество полюсов (n) переменного тока принято три для троллейных линий и четыре, соответственно, для шин. Для системы питания постоянного тока коэффициенты определены как отношение их параметров.

Для рассматриваемых вариантов сравнительная оценка приведена в приложении В, таблица В. 3. На основании расчетных данных, приведенных в таблице В. 3, можно сделать вывод, что при равной номинальной нагрузке система питания постоянного тока для рассматриваемых объектов выгодно отличается от системы питания переменного тока и позволяет:

1) уменьшить расчетную мощность трансформатора на 12 % для рассматриваемых примеров при $n_{\text{эф}}^* = 2, k_{\text{исп}} = 0,5$ и на 13% при $n_{\text{эф}}^* = 1,75, k_{\text{исп}} = 0,3$, что позволяет снизить загрузку силовых трансформаторов, и прогнозируемую потерю электроэнергии в них систем питания постоянного тока по сравнению с переменным током;

2) уменьшить сечения троллейных линий с учетом количества полюсов до 79 % и шин до 81 % по условию допустимой потери напряжения при $\cos\varphi = 0,95$.

Таблица 2.7 – Сравнительная оценка СЭК с ЧРП

Критерий	переменный				постоянный		переменный				постоянный	
1. $P_{\text{расч}}$ СЭК, при $P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}}$	$P_{\text{расч}} = 1$; $n_{\text{эф}} = 3$; $k_{\text{исп}} = 0,2$;				$P_{\text{расч}} = 0,57$; $n_{\text{эф}} = 12$; $n_{\text{эф}}^* = 4$ $k_{\text{исп}} = 0,2$;		$P_{\text{расч}} = 1$; $n_{\text{эф}} = 3$; $k_{\text{исп}} = 0,5$;				$P_{\text{расч}} = 0,87$; $n_{\text{эф}} = 12$; $n_{\text{эф}}^* = 4$; $k_{\text{исп}} = 0,5$;	
Экономия на $P_{\text{расч}}$ трансформатора	$P_{\text{расч}} = \frac{1 - 0,57}{1} \cdot 100\% = 43\%$,						$P_{\text{расч}} = \frac{1 - 0,77}{1} \cdot 100\% = 23\%$					
Токоведущий материал	Троллейная линия (сталь)						Шина (алюминий)					
	$\cos\varphi = 0,5$		$\cos\varphi = 1$		-		$\cos\varphi = 0,5$		$\cos\varphi = 1$		-	
2. $I_{\text{расч}}$, при $P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}}$	2		1		0,87		2		1		0,97	
j^* , о.е.	1		1		1,46-2,2		1		1		1,01-1,1	
Сечение полюса (S_j^*), о.е.	2		1		0,6-0,4		2		1		0,97-0,82	
3. $\Delta U_{\text{доп.}}$	$\Delta U_{\text{доп}} \leq 5\%$				$\Delta U_{\text{доп}} \leq 4\%$		$\Delta U_{\text{доп}} \leq 5\%$				$\Delta U_{\text{доп}} \leq 4\%$	
$\text{tg}\varphi/j^*$	0,58/1	0,58/1	0,58/1	0,58/1	-1,46	-2,2	1,2/1	4,6/1	1,2/1	4,6/1	-1,01	-1,1
ΔU_{γ} , /100 м	4,99%	4,99%	4,99%	4,89%	3,98%	3,99%	4,9%	4,9%	4,9%	4,9%	3,88%	4%
Граничная длина $l_{\text{гр}}^*$, о.е.	1	1	1,002	1,002	1,61	1,071	1	1	0,95	0,9	1,27	4,3
Сечение ($S_{\Delta U}^*$), о.е.	4,48	3,2	2,24	1,6	1,31	0,81	2,54	4,8	1*	1*	1,18	0,82*
Сечение п- полюсов (S^*), о.е	13,44	9,6	6,72	4,8	2,62	1,62	10,16	19,2	4	4	2,36	1,64
Экономия на сечении п- полюсов, $\cos\varphi = 0,5$	$S = \frac{(13,44 \div 9,6) - (2,62 \div 1,62)}{(13,44 \div 9,6)} \cdot 100\% = 80,5 \div 83\%$						$S = \frac{(10,16 \div 19,2) - (2,36 \div 1,64)}{(10,16 \div 19,2)} \cdot 100\% = 77 \div 91\%$					
Экономия на сечении п- полюсов, $\cos\varphi = 1$	$S = \frac{(6,72 \div 4,8) - (2,62 \div 1,62)}{(6,72 \div 4,8)} \cdot 100\% = 61 \div 66\%$						$S = \frac{(4 \div 4) - (2,36 \div 1,64)}{(4 \div 4)} \cdot 100\% = 41 \div 59\%$					
4. Потери мощности	1		0,25		0,0065		1		0,25		0,09	
Экономия на потерях мощности, $\cos\varphi = 1$	$\Delta P = \frac{0,25 - 0,065}{0,25} \cdot 100\% = 74\%$						$\Delta P = \frac{0,25 - 0,09}{0,25} \cdot 100\% = 65\%$					
Экономия на потерях мощности, $\cos\varphi = 0,5$	$\Delta P = \frac{1 - 0,065}{1} \cdot 100\% = 94\%$						$\Delta P = \frac{1 - 0,09}{1} \cdot 100\% = 91\%$					

Выводы

1) Усовершенствован метод выбора СЭК с ЧРП, позволяющий производить сравнительную оценку для двух родов напряжений: постоянного и переменного. Получены аналитические соотношения относительных коэффициентов: расчетных мощностей, сечений токоведущего материала, допустимой потери напряжения, которая определяет граничные длины и сечения токоведущих проводников, а также потерь мощности в шинах и троллейных линиях систем питания постоянного и переменного тока. При сравнительной оценке систем питания постоянного и переменного тока возможно:

- снижение расчетной мощности трансформатора при $n_{эф}^* = 4$ составляет 43 % для $k_{исп} = 0,2$ и 23 % для $k_{исп} = 0,5$, что позволяет снизить номинальную мощность силовых трансформаторов или их загрузку при сохранении номинальной мощности, а также уменьшить сечения токопроводов систем питания постоянного тока по сравнению с переменным током;

- уменьшение сечения токопроводов по условию нагрева в зависимости от используемого сечения за счет отсутствия поверхностного эффекта в токопроводах постоянного тока: при $\cos \varphi = 0,5$, $n_{эф}^* = 4$ и $k_{исп} = 0,5$ уменьшение сечения шин находится в диапазоне 46,8÷55 % и троллейных линий - 63÷75,6 %; при $k_{исп} = 0,2$ уменьшение сечения шин находится в диапазоне 52,7÷60,2 % и троллейных линий - 67÷78,3 %. При $\cos \varphi = 1$, $n_{эф}^* = 4$ и $k_{исп} = 0,5$ уменьшение сечения шин находится в диапазоне 3 ÷ 18 % и троллейных линий - 33,2 ÷ 55,3 %; при уменьшении коэффициента использования до $k_{исп} = 0,2$ уменьшение сечения шин находится в диапазоне 13,4 ÷ 27 % и троллейных линий - 40÷60 %.

- уменьшение сечения токопроводов по условию допустимой потери напряжения за счет применения напряжения 600 В в СЭК постоянного тока по сравнению с СЭК переменного тока 380 В в зависимости от используемого сечения при равной длине: при $\cos \varphi = 0,5$ или $\cos \varphi = 1$

происходит в диапазоне $80,5 \div 83\%$ или $61 \div 66\%$ для троллейных линий и в диапазоне $77 \div 91\%$ или $41 \div 59\%$ - для шин;

- уменьшение удельных потерь мощности в токопроводах при $\cos \varphi = 0,5$ или $\cos \varphi = 1$ происходит при использовании троллейных линий до 94% или до 74% , при использовании шин - до 91% или 65% .

2) В результате сравнительной оценки установлено, что система питания постоянного тока для крановых установок с ЧРП по всем оцениваемым критериям превосходит систему питания переменного тока. СЭЖ с ЧРП постоянного тока могут быть рекомендованы при проектировании СЭЖ или при модернизации электроприводов кранов на ЧРП, так как обеспечивают существенное уменьшение материальных затрат и потерь мощности.

3 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КРАНОВ С ЧАСТОТНО- РЕГУЛИРУЕМЫМ ПРИВОДОМ

Как указывалось ранее, активный выпрямитель, управляемый импульсом длительностью 120° , начало которого синхронизировано с моментом открытия соответствующего диода, позволяет производить рекуперацию энергии в сеть без существенного повышения напряжения в звене выпрямления, величина которого определяется потерей напряжения в питающей линии.

С точки зрения рекуперации энергии активный выпрямитель представляет собой инвертор, коммутация в котором осуществляется при $\beta = 180^\circ$, что соответствует $\alpha = 0^\circ$, и по сути физических процессов обладает двухсторонней проводимостью, а величина тока определяется разностью напряжений на конденсаторе фильтра и мгновенного значения напряжения питающей сети. В дальнейшем он получил название активного выпрямителя (АВ) с двухсторонней проводимостью.

Указанные обстоятельства вызывают необходимость исследования особенностей электромагнитных процессов и их влияния на питающую сеть.

3.1 Особенности электромагнитных процессов активного выпрямителя с двухсторонней проводимостью

Режим выпрямления достаточно исследован [55]. Угол коммутации определяется выражением без учета активных сопротивлений при значении индуктивности нагрузки $L_d = \infty$:

$$\gamma = \arccos \left(1 - \frac{2I_d \omega_\phi L_\phi}{\sqrt{6} \cdot U_\phi} \right) = \arccos \left(1 - \frac{2I_d^* U_{кз}}{\sqrt{6} \cdot U_\phi} \right) \quad (3.1)$$

где U_ϕ – фазное напряжение,

ω_ϕ – угловая частота,

I_d – ток в звене выпрямления, относительное значение $I_d^* = \frac{I_d}{I_{ном.Ф}}$,

L_ϕ – индуктивность фазы сети питания,

$U_{кз}$ – напряжение короткого замыкания $U_{кз} = \frac{I_{ном.Ф} \omega_\phi L_\phi}{U_\phi}$.

В основной массе в звене выпрямления, как правило, отсутствует сглаживающий дроссель L_d , что приводит к значительным пульсациям выпрямленного тока I_d и к увеличению гармоник фазного тока, что соответственно, ухудшает коэффициент искажения.

Наличие двухсторонней проводимости вызывает ряд особенностей в работе АВ в широком диапазоне изменения нагрузки.

Анализ электромагнитных процессов СЭК с ЧРП рассматривается с учетом допущений, принятых в главе 2, а также:

а) высокочастотные пульсации напряжения на конденсаторе фильтра от токов инверторов, питающих двигатели, не учитываются;

б) m - АИН-ШИМ и соответственно m - двигателей заменены общим (эквивалентным) источником тока в режиме потребления или в режиме генерации;

в) IGBT-транзисторы с диодами рассматриваются как ключи, обладающие двусторонней проводимостью. При коммутации время включения транзистора $t_{вкл}$ примерно равно времени его выключения $t_{выкл}$.

Управление IGBT-транзисторами входного АВ осуществляется непрерывным импульсом на протяжении 120° , который синхронизирован с моментом открытия соответствующих им диодов. Транзистор совместно с основным диодом в зоне проводимости (дио́да) образуют двунаправленную проводимость. Управление IGBT-транзисторами входного АВ

осуществляется от блока управления. Знак тока определяется разностью между напряжением на входе и выходе преобразователя. Обмен энергией происходит под действием разности напряжения источника питания U_d и напряжения на емкости фильтра C_f в звене выпрямления.

На интервале проводимости (каждые 120°) двунаправленного ключа АВ характерны два режима работы: режим потребления (РП) электроэнергии $U_d > U_{Cf}$ или режим рекуперации (РР) энергии в питающую сеть $U_d < U_{Cf}$.

При выпрямлении открыты диоды мостового выпрямителя на интервале проводимости. Эквивалентный источник тока работает в режиме потребления (условно положительное направление тока) и отображает процесс преобразования энергии сети переменного тока в энергию постоянного тока на выходе.

При рекуперации открыты IGBT-транзисторы. Эквивалентный источник тока в звене выпрямления работает в режиме генерации (условно отрицательное направление тока) и отображает процесс передачи постоянного тока в питающую сеть.

В интервал проводимости входят коммутационный (γ) и межкоммутационный интервал $(2\pi/3 - \gamma)$.

Расчетная схема с учетом допущений для исследования электромагнитных процессов ПЧ имеет вид, рисунок 3.1.

Активное и индуктивное сопротивления фазы:

$$R_\phi = \sum_{i=1}^n R_i; X_\phi = \omega \cdot L_\phi,$$

$$\text{Индуктивность фазы: } L_\phi = \sum_{i=1}^n L_i$$

где R_i, L_i — активное сопротивление и индуктивность i -го элемента схемы замещения.

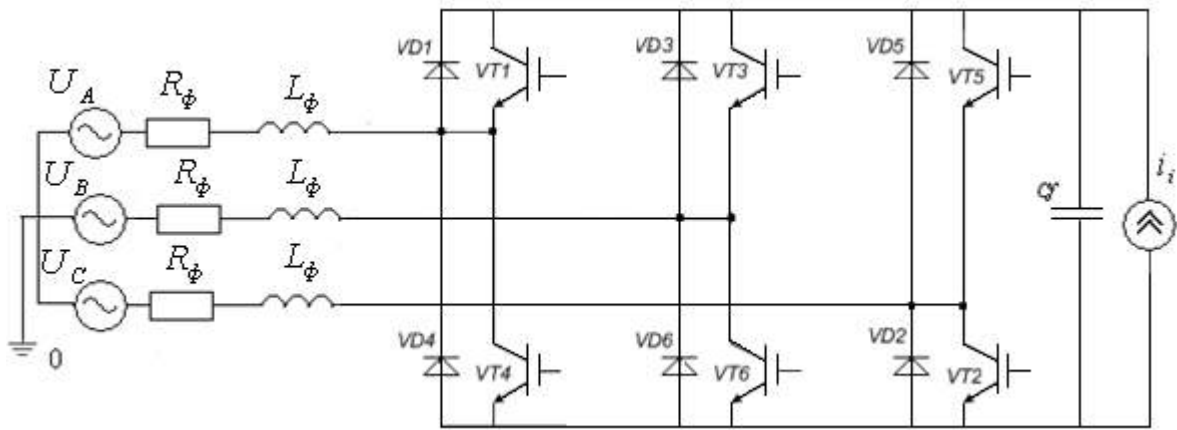


Рисунок 3.1 - Расчетная схема для исследования электромагнитных процессов

Зависимость напряжения $U_d(t)$ неуправляемого выпрямителя на межкоммутационном интервале определяется соотношением [77].

$$U_d(t) = \sqrt{3}U_{\phi m} \cos\left(\omega_{\phi}t - \frac{\pi}{6}\right) = \sqrt{3}U_{\phi m} \sin\left(\omega_{\phi}t + \frac{\pi}{3}\right) \quad (3.2)$$

где $U_{\phi m}$ – амплитудное фазное напряжение,

$\omega_{\phi}t$ – интервал проводимости ключа от нуля до $2\pi/3$.

Для межкоммутационного и коммутационного интервалов при рекуперации составлены расчетные схемы соответственно, рисунок 3.3 и 3.4.

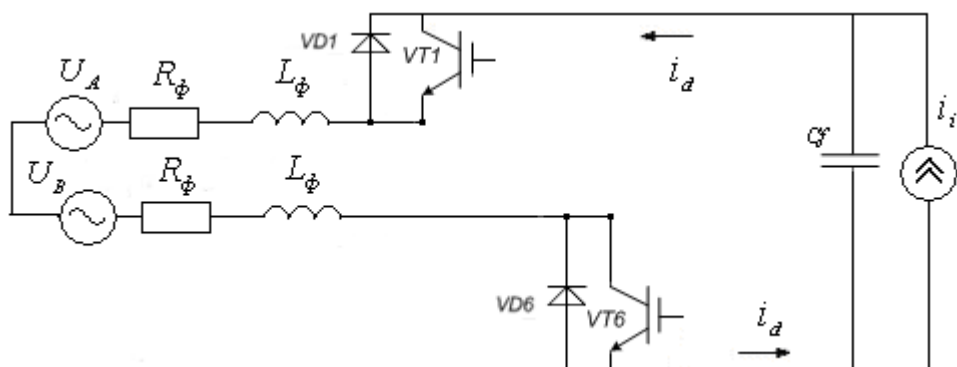


Рисунок 3.2 – Расчетная схема активного выпрямителя для межкоммутационного интервала

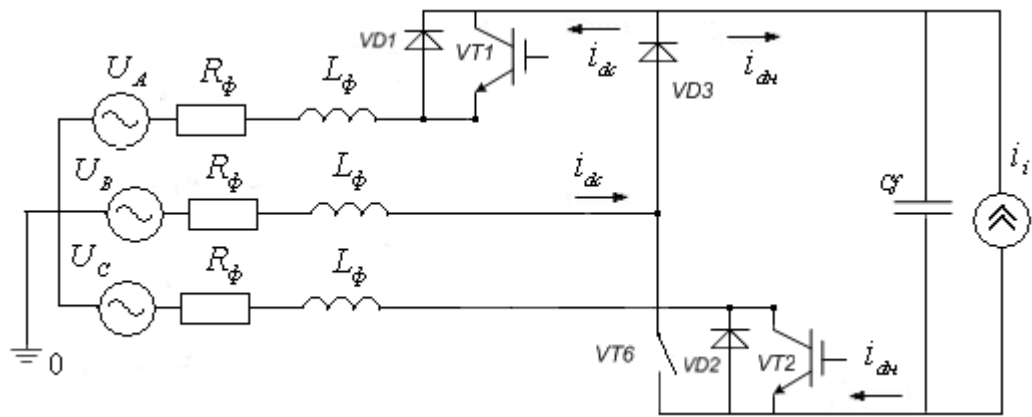


Рисунок 3.3 – Расчетная схема активного выпрямителя для интервала коммутации

В момент коммутации ключ фазы, заканчивающий токопроводящий период VT6 (на рисунке 3.3 пара диод VD6 и транзистор VT6 условно показаны ключом) мгновенно размыкается, но ток цепи, содержащей индуктивность, замыкается через диод VD3, противоположный ключу, что обеспечивает сброс энергии предкоммутационной фазы.

В результате открытия диода VD3 в момент коммутации создаются дополнительно два контура: сетевой I через диод VD3 и транзистор VT1 и нагрузочный II (через диод VD3 и транзистор VT2).

Во II нагрузочном контуре ($i_{dh}(t)$) происходит преобразование электромагнитной энергии $W_M = L_\phi i^2 / 2$, накопленной в предкоммутационный период в фазной индуктивности сети L_ϕ , в потенциальную энергию $W_3 = mC_f U^2 / 2$ конденсатора.

Решение системы уравнений на интервалах коммутации приводит к сложным трансцендентным уравнениям, которые решаются численными методами [15].

Для оценки длительности сброса электромагнитной энергии (эквивалентного угла коммутации) выходящей из работы фазы запишем уравнение для тока:

$$i_d = i_0 e^{-\frac{t}{T_\phi}} \quad (3.3)$$

где i_0 - ток в момент коммутации;

$T_\phi = L_\phi / R_\phi$ – постоянная затухающая.

Таким образом, время спада будет определяться постоянной затухающей времени фазы источника питания и численно будет принято 4-5 T_ϕ .

При $R_\phi \ll \omega L_\phi$ удобно воспользоваться уравнением :

$$\Delta E = L_\phi \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (3.4)$$

где $\Delta E = U_m (1 - \sin \pi/3)$ при $U_m = U_{cf}$, тогда

$$\gamma' = \Delta t = L_\phi \frac{\Delta i}{\Delta E} = \frac{X_\phi I_d}{0,134 U_m 2\omega} = \frac{U_{кз(о.е.)}}{0,134 \sqrt{6} \omega} i_d^* \quad (3.5)$$

где $i_d^* = \Delta i / I_d$; $X_\phi = \omega L_\phi$; $I_\phi = \sqrt{3} I_d / 2$.

Таким образом, угол сброса электромагнитной энергии (γ') пропорционален напряжению $U_{кз}$ и относительному значению тока i_d^* в момент коммутации. Поскольку ток разделяется на две ветви, то это приводит соответственно к появлению пика сброса электромагнитной энергии в фазном токе с амплитудой, равной $0,5 I_d$ в момент коммутации, которая нарастает в соответствии с выражением (3.3).

Так как, ток при коммутации проходит по двум фазам, то в момент коммутации имеется несимметрия напряжений. Коммутация в режиме потребления происходит при напряжении фазы меньше на падение напряжения $\Delta U = I_d \cdot R_\phi$ (рисунок 3.4 а), что вызывает сдвиг коммутации в сторону опережения на величину ρ . В отличие от коммутации диодов коммутация транзисторов в режиме рекуперации имеет сдвиг фаз ρ в сторону отставания (рисунок 3.4 б).

Величина сдвига фазы тока определяется из соотношения:

$$\rho = \arcsin \left(\mp \frac{I_d R_{\phi}}{\sqrt{2} U_{\text{л}}} \right) \quad (3.6)$$

где $(-)$ – для режима потребления, $(+)$ – для режима рекуперации,

I_d – значение тока в момент коммутации при рекуперации энергии;

$U_{\text{л}}$ – линейное напряжение.

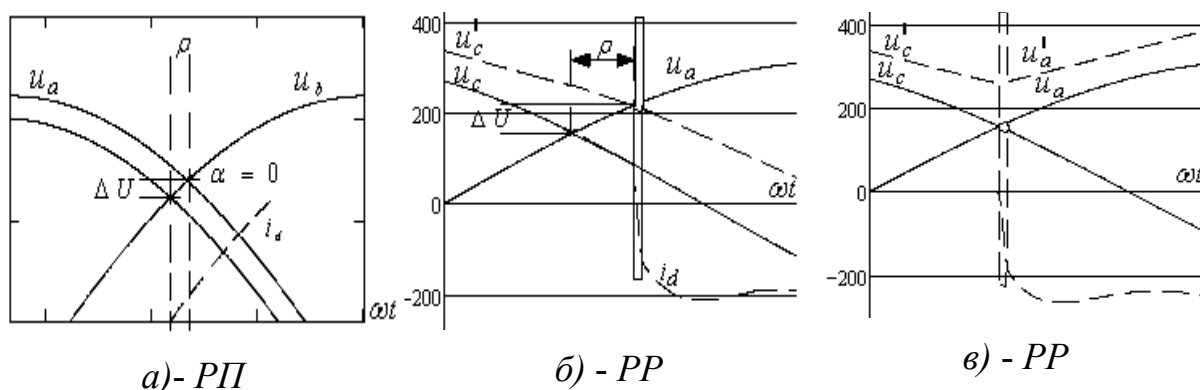


Рисунок 3.4 – Коммутация в активном выпрямителе

На рисунках 3.4 б и 3.4 в приведены осциллограммы момента коммутации в РР при различных способах синхронизации работы ключей АВ. На рис. 3.4 б показана осциллограмма при коммутации ключей АВ, синхронизированных с входным напряжением соответствующих диодов. При значении тока рекуперации $I_d = -250$ А величина угла сдвига достигает 6° , что достаточно точно совпадает с расчетом. Величина реактивной мощности пропорциональна $\operatorname{tg} \rho = \operatorname{tg} 6^\circ \approx 0,1$, что вызывает потребление реактивной мощности до 10%. Указанный недостаток существенно проявляется в СЭК, реализованными троллейными линиями, имеющими большее активное сопротивление по сравнению с СЭК, реализованными шинами (рисунок 3.5).

Для ликвидации этого недостатка синхронизация транзисторов АВ выполняется с напряжением источника питания (рисунок 3.4 в) при которой отсутствует сдвиг угла коммутации.

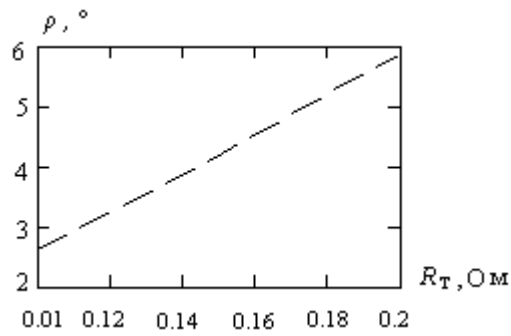


Рисунок 3.5 – Зависимость значения угла сдвига фазы ρ в РР

Необходимо обратить внимание, что ток рекуперации в крановых механизмах меньше тока потребления и определяется из соотношения:

$$I_{\text{ином.п}} - I_{\text{ином.р}} = \frac{P_1}{U_d \eta_1} - \frac{P_2 \eta_2}{U_d} = \frac{P_1}{U_d} \left(\frac{1}{\eta_1} - P^* \eta_2 \right) = \frac{P_1}{U_d} \left(\frac{1}{\eta_1} - \frac{P^* \eta_2 \eta_1}{\eta_1} \right) \quad (3.7).$$

где P_1 , P_2 – мощность, необходимая для разгона (подъема) и торможения (опускания), Вт;

$P^* = P_2/P_1$ – относительное значение мощностей;

U_d – напряжение в звене постоянного тока, В.

η_1, η_2 – КПД электропривода с механизмом в режиме разгона и торможения.

При $P_1 = P_2 = P_{\text{пч}}$, $\eta_1 = \eta_2 = \eta$ выражение (3.7) преобразуется :

$$\Delta I = \frac{P_{\text{пч}} \cdot (1 - \eta^2)}{U_d \eta} = I_1 \frac{(1 - \eta^2)}{\eta} \quad (3.8)$$

При $\eta = 0,8$, значение $\Delta I \approx 0,45 I_1$. Таким образом, ток рекуперации существенно зависит от общего КПД механизма и загрузки крана. Из (3.8) следует, что при снижении нагрузки двигателя резко падает эффективность режима рекуперации. Экономия энергии достигается, в основном, за счет возврата энергии, накопленной в маховых массах механизма и в режимах частотного пуска.

Исходя из изложенного, следует, что мощность в режиме рекуперации составляет примерно 50 % от максимальной мощности в режиме потребления. Данный факт влияет на выбор мощности и стоимость преобразователя.

Современные ПЧ с емкостным фильтром имеют значительную величину пульсаций тока I_d выпрямителя. Поскольку момент механизмов крана при отсутствии перемещаемого груза составляет 0,2-0,3 от номинального [95, 113], то это приводит соответственно к уменьшению потребляемого тока и увеличению пульсаций вплоть до начально-непрерывного и прерывистого тока. В связи с этим целесообразно рассмотреть режим начально-непрерывного тока (рисунок 3.6), который определяет границу существенного возрастания коэффициента гармоник фазного тока, как будет показано ниже (рисунок 3.15).

Расчетная форма (а) и экспериментальная осциллограмма фазного тока (б) в режиме начально-непрерывного тока представлена на рисунке 3.6.

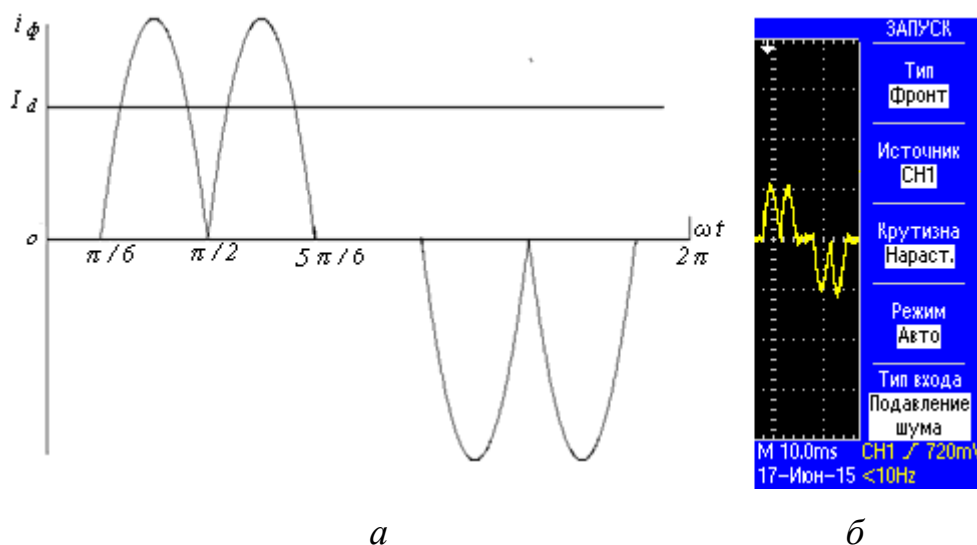


Рисунок 3.6 – Расчетная кривая (а) и экспериментальная осциллограмма (б) фазного тока выпрямителя в режиме начально-непрерывного тока

Разложение кривой тока в ряд Фурье дает следующее выражение, полагая, что кривая тока имеет синусоидальный характер :

$$i_{\phi} = \frac{9}{8} I_d \left(\sin \omega t + \frac{1}{2} \sin 5\omega t + \frac{1}{5} \sin 7\omega t + \frac{1}{14} \sin 11\omega t + \frac{1}{20} \sin 13\omega t + \frac{1}{45} \sin 17\omega t + \frac{1}{48} \sin 19\omega t + \frac{1}{65} \sin 23\omega t + \frac{1}{77} \sin 25\omega t \right). \quad (3.9)$$

Наличие значительных амплитуд 5-ой и 7-ой гармоники приводит к увеличению добавочных потерь мощности в шинах и троллейных линиях. Например, активное сопротивление троллейных линий определяется соотношением [94]:

$$\left. \begin{aligned} R &= K_{\omega} R_0 \\ K_{\omega} &= 0,758 + 1,159\beta, \text{ при } \beta \geq 3 \\ \beta &= 2 \cdot 10^{-2} \frac{S}{P} \cdot \sqrt{\frac{f}{\rho_t}} \mu \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

где S – сечение троллейных линий, см^2 ;

P – периметр, см ;

μ – магнитная проницаемость стального проводника определяется по кривым [95] в зависимости от напряженности магнитного поля $H = \frac{0,4\pi I}{P}$,

ρ_t – удельное сопротивление постоянному току, $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$.

I – ток, протекающий по шине.

При токе 395 А для уголка (60×60×6) мм значения $H = 17,3$ А/м и $\mu \approx 1000$. Для рассматриваемого начально-непрерывного режима ($I \approx 0,5 \cdot I_n$) на частоте 250 и 350 Гц значение β возрастает в 6,75-8 раз соответственно. Сопротивление возрастает в 7,5-8,75 раз соответственно. Дополнительные потери мощности от составляющих 5, 7 гармоник увеличиваются по отношению к потерям от основной гармоники в 2,2 раза, что приводит к увеличению суммарных потерь более чем в 3,2 раза. Коэффициент искажения (ν) для такой формы $\approx 0,75$. Расчет потерь мощности по (2.27) приводит к их увеличению примерно в 1,77 раза. Отношение потерь мощности с учетом более высоких порядков гармоник по отношению к

потерям мощности, рассчитанным по (2.27), доходит до 2 раз. Указанное обстоятельство вызывает необходимость проверки шин и троллейных линий на нагрев и потери мощности с учетом высших гармоник для каждого конкретного случая, при условии, что ν меньше 0,9.

Сравнивая значения амплитуд соответствующих гармоник тока для прямоугольной формы [79],

$$i_{\phi} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi n} I_d, \quad (3.11)$$

видим, что при равных значениях амплитуд выпрямленного тока в режиме начально-непрерывного тока существенно в $\approx 1,5$ раза возрастает значение 5-ой и 7-ой гармоник при уменьшении амплитуд остальных гармоник.

Значение среднего тока рекуперации в режиме начально-непрерывного тока определяется из следующих соображений.

Для выпрямительного режима угол начально-непрерывного тока определяется из соотношения [16]:

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{гр}} = \frac{m}{n} - \operatorname{ctg} \frac{\pi}{m} \quad (3.12)$$

Значения $\alpha_{\text{гр}}$ приведены в таблице 3.1 [16].

Таблица 3.1- Значение $\alpha_{\text{гр}}$

m	6	12
$\alpha_{\text{гр}}$	$10,5^\circ$	$5,1^\circ$

Средний выпрямленный ток определяется вольт-секундной площадкой $S^*_{\text{в}}$, ограниченной значением среднего выпрямленного напряжения при $\alpha=0$ и $\alpha=\alpha_{\text{гр}}$, рисунок 3.7.

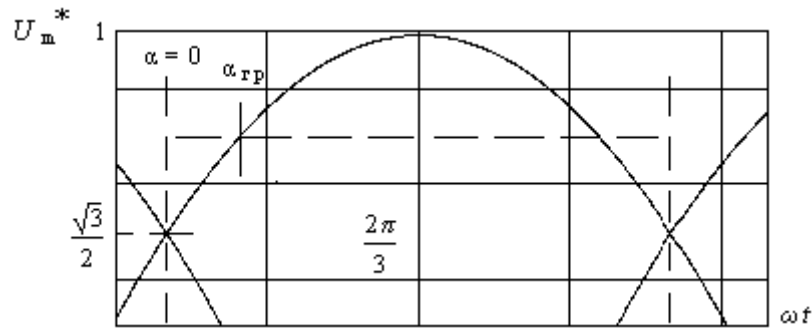


Рисунок 3.7 – Вольт-секундная площадь в ВР и РР

$$S_{\text{в}}^* = \frac{U_m \cos\left(\frac{\pi}{3} + \alpha_{\text{гр}}\right)}{U_m} - \frac{U_{d0} \cos\left(\frac{\pi}{3}\right)}{U_m} \quad (3.13)$$

$$S_{\text{в}}^* = 0,93 - 0,866 = 0,0647$$

Режим рекуперации начинается при $\alpha_{\text{гр}}=0$, так как $\alpha=0$ $U_{\text{ф}}(t) - U_{\text{cf}} > 0$.

Режим начально-непрерывного тока при рекуперации начинается при $\alpha_{\text{гр}} = 0$ и определяется равенством вольт-секундных площадей, обеспечивающих переменную составляющую напряжения между кривой входного напряжения и напряжения на конденсаторе фильтра. Полагая, $U_{\text{cf}} = U_m$ получим:

$$S_{\text{р}}^* = \frac{U_{\text{cf}}}{U_m} - \frac{U_{d0} \cos \alpha}{U_m} \quad (3.14)$$

$$S_{\text{р}}^* = 1 - 0,955 = 0,035$$

$$\text{Отношение } S_{\text{в}}^*/S_{\text{р}}^* = 0,0647/0,035=1,91 \quad (3.15)$$

Следовательно, средний ток рекуперации в режиме начально-непрерывного тока практически вдвое меньше, чем в режиме выпрямления.

Для более полного исследования электромагнитных процессов используется имитационное моделирование.

3.2 Исследование электромагнитных процессов в системе электропитания кранов переменного тока

Применение имитационного моделирования позволяет снизить трудоемкость и сроки проведения расчета, и одновременно увеличить количество исследуемых режимов и вариантов схемного исполнения сети при исследовании довольно сложных схем с учетом параметров системы питания и процессов коммутации ключей. Для исследования электромагнитных процессов в соответствии с расчетной схемой ПЧ (рисунок 3.1) и схемой замещения СЭК (рисунок 2.3 а) составлена модель, рисунок 3.8.

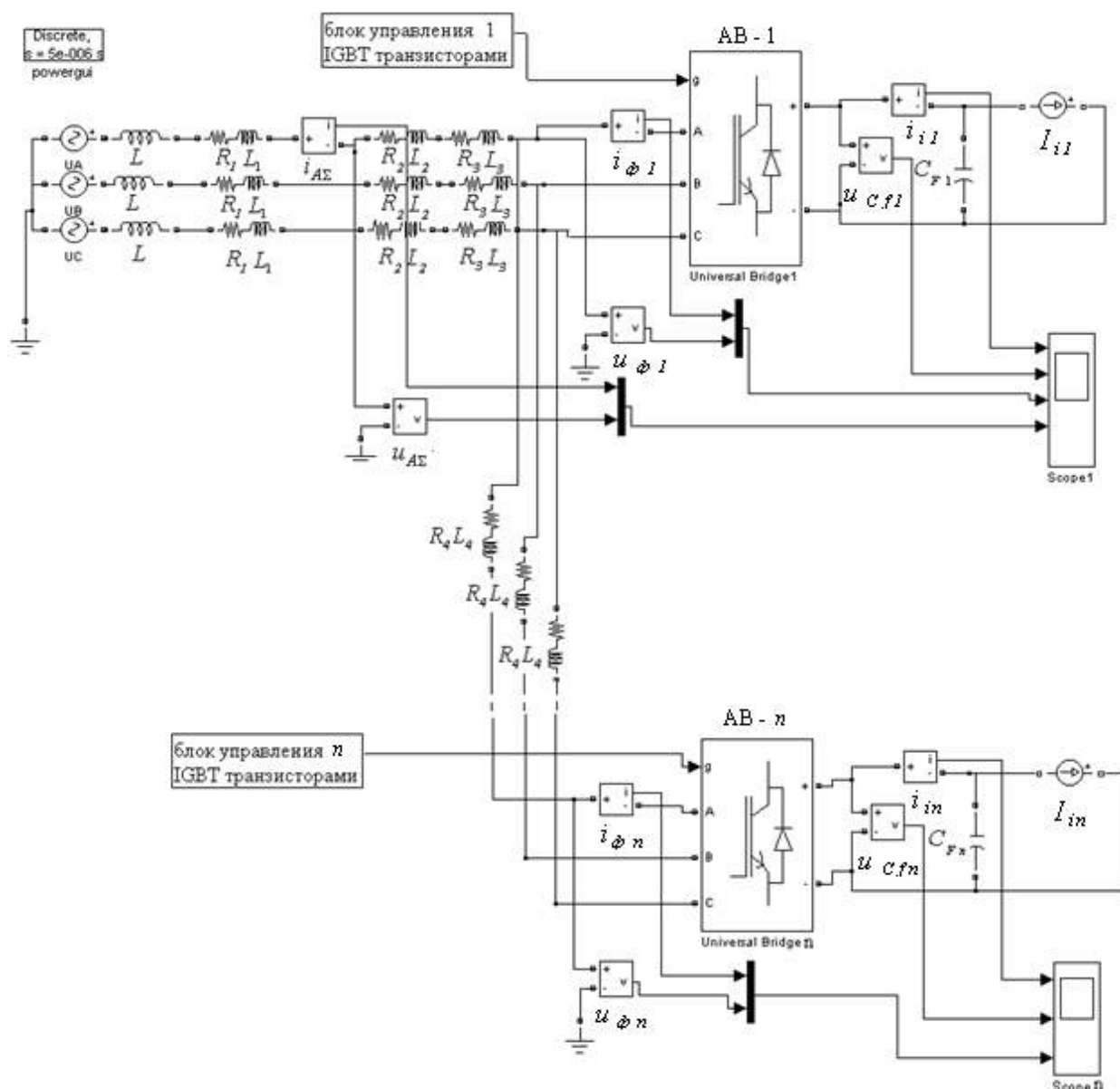


Рисунок 3.8 – Модель СЭК с шиной переменного тока

Управление транзисторами осуществлялось с помощью блока управления, который формирует импульсы длительностью 120° .

На имитационной модели исследуются: напряжение и ток на выходе $u_{Cf1} \dots u_{Cfn}$ и $i_{i1} \dots i_{in}$ и на входе $u_{\phi1} \dots u_{\phi n}$ и $i_{\phi1} \dots i_{\phi n}$ АВ, а также суммарный ток и напряжение на РУ -0,4кВ питающего трансформатора $i_{A\Sigma}, u_{A\Sigma}$.

Численное решение системы дифференциальных уравнений было произведено методом Rosenbrock (ode23s) с переменным шагом интегрирования [2, 14, 23].

Исследования проводились при изменении напряжения короткого замыкания ($U_{кз}$) относительно мощности ПЧ в диапазоне $U_{кз} (S_{пч}) = 1,61-7,6 \%$. Обеспечение допустимых пульсаций напряжения в звене постоянного напряжения обеспечивается включением емкости конденсатора 80-120 мкФ на 1 кВт мощности. Значение емкости конденсатора варьировалось в пределах $C_F = (5 \div 30) \cdot 10^3$ мкФ. В результате исследования было установлено, что увеличение емкости конденсатора до определенного предела ($C_F = 20 \cdot 10^3$ мкФ, что соответствует 80 мкФ на 1 кВт мощности) не приводит к существенному уменьшению пульсаций напряжения в звене выпрямления и подтверждается исследованиями [63, 64]. Конденсатор C_F первоначально заряжен до напряжения 600 В для уменьшения времени пускового переходного процесса.

Исследования проводились для СЭК с ЧРП со следующими параметрами: $U_\phi = 220$ В, $P_{пч} = 240$ кВт, $S_{пч} = 270$ кВА, $L_\phi = 57,54 \cdot 10^{-6}$ Гн.

Максимальное значение источника тока определяется из перегрузочной способности инвертора [94]:

$$I_{imax} = \lambda_i \cdot I_{iном} \quad (3.16)$$

где λ_i - перегрузочная способность инвертора, $\lambda_i=1,1-1,2$ [91].

На рисунке 3.9 представлена осциллограмма работы АВ в режиме

рекуперации.

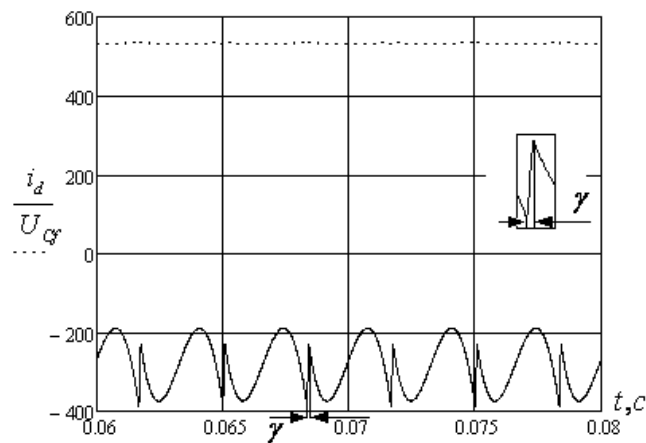


Рисунок 3.9 - Осциллограмма тока (i_d) и напряжения (U_{cf}) в режиме рекуперации: $I_i = -250$ А, $U_{кз}(S_{пч}) = 3,1$ %

На рисунке 3.9 видно отсутствие существенных пульсаций напряжения на емкости фильтра (C_f), что подтверждает принятое допущение, пункта 3.1.

Осциллограммы фазного тока и напряжения питающей сети для наиболее характерных режимов работы крана представлены на рисунках 3.10- 3.12, $U_{кз}(S_{пч}) = 3,1\%$.

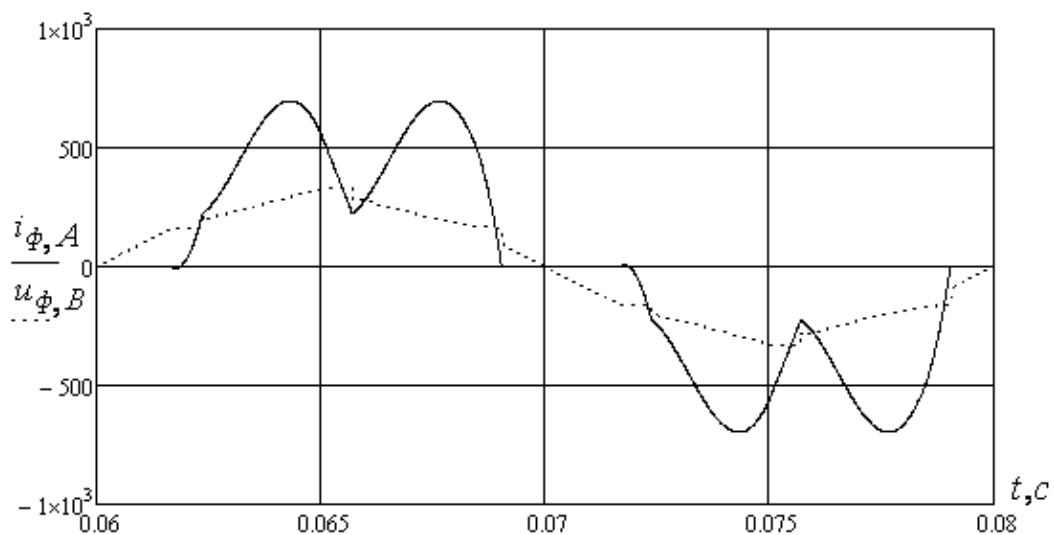


Рисунок 3.10 – Осциллограммы тока (i_ϕ) и напряжения (u_ϕ) в режиме потребления $I_i = 500$ А; $U_{кз}(S_{пч}) = 3,1$ %

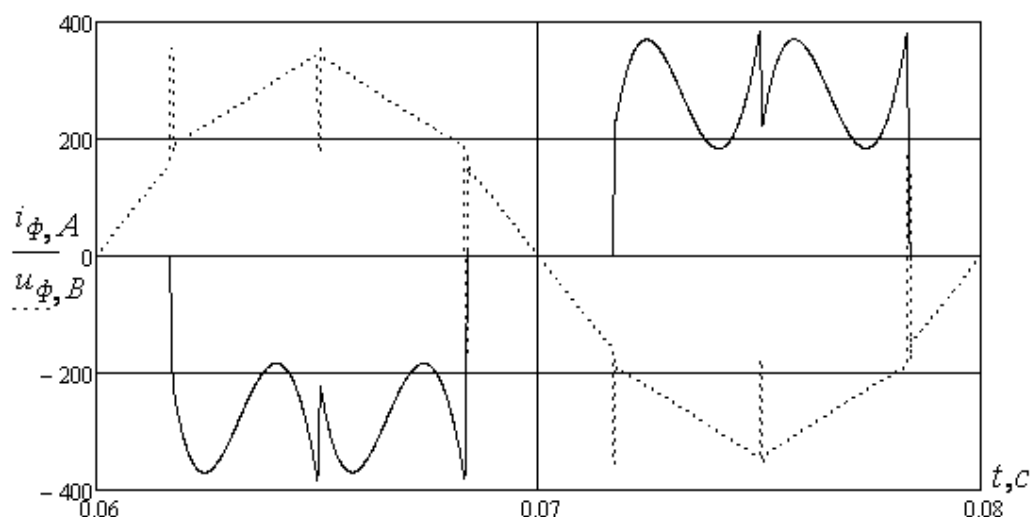


Рисунок 3.11 – Осциллограммы тока (i_ϕ) и напряжения (u_ϕ) в режиме рекуперации $I_i = -250$ А; $U_{кз}(S_{пч}) = 3,1$ %

Величина коммутационного всплеска в кривой входного напряжения определяется величиной напряжения конденсатора фильтра.

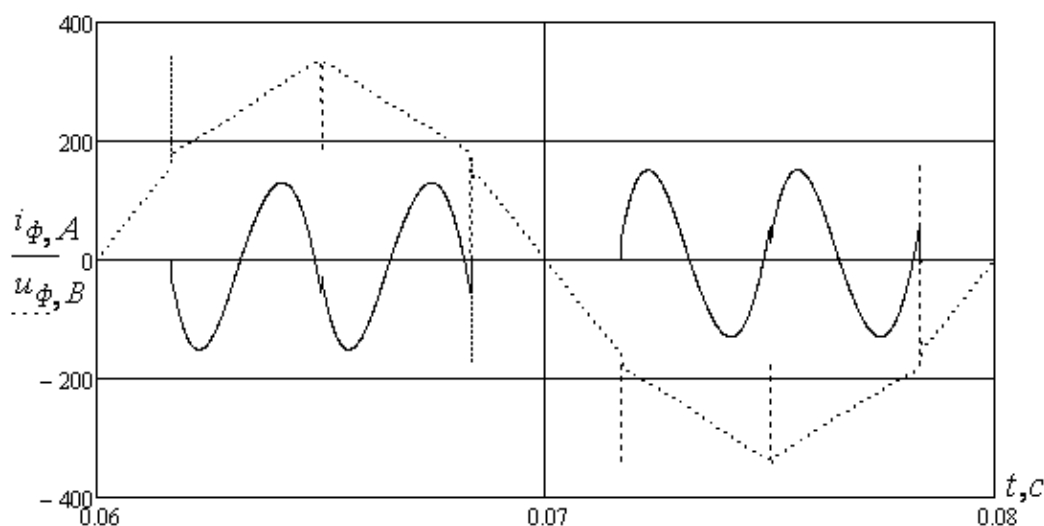


Рисунок 3.12 – Осциллограммы тока (i_ϕ) и напряжения (u_ϕ) в режиме XX

В режиме XX в фазном токе присутствуют высокочастотные составляющие (5, 7 и т.д. гармоники), что объясняется изменением знака разности напряжений $U_{Cf} - U_d$ за период π/m . Эти составляющие присутствуют в фазном токе в режиме рекуперации, что вызывает отличие

Продолжение таблицы 3.2

13	14,5/6,13	14,2/6	2,1%	15,6/12,2	16,51/2,96	24,7/8,9
17	7,3/3,48	6,75/2,86	7,5%	12,3/9,6	16,44/2,95	22,2/7,98
19	5,5/2,32	5,25/2,22	4,5%	8,6/6,7	9,96/1,8	16,41/5,9

Анализ результатов таблицы 3.2 показывает, что в выпрямительном режиме (ВР) ($I_d = 500\text{A}$) максимальное значение имеет 5-ая гармоника, а в РР ($I_d = -250\text{A}$) - 7-ая гармоника. При рекуперации гармоники высоких порядков 13 и выше в 1,4-2 раза больше по сравнению с режимом выпрямления, достигая значения 6 - 12 % от основной гармоники. Большее значение гармоник высоких порядков связано с особенностью коммутации IGBT-транзисторов. Относительные значения гармоник фазного тока представлены на рисунке 3.13. Значение коэффициента гармоник фазного тока THD_I (или TDD_I) при номинальных токах в ВР и РР находятся на уровне 60 % и 70 %, что более разрешенного стандартом уровня - 20 % [121] и 48 % [120, 124].

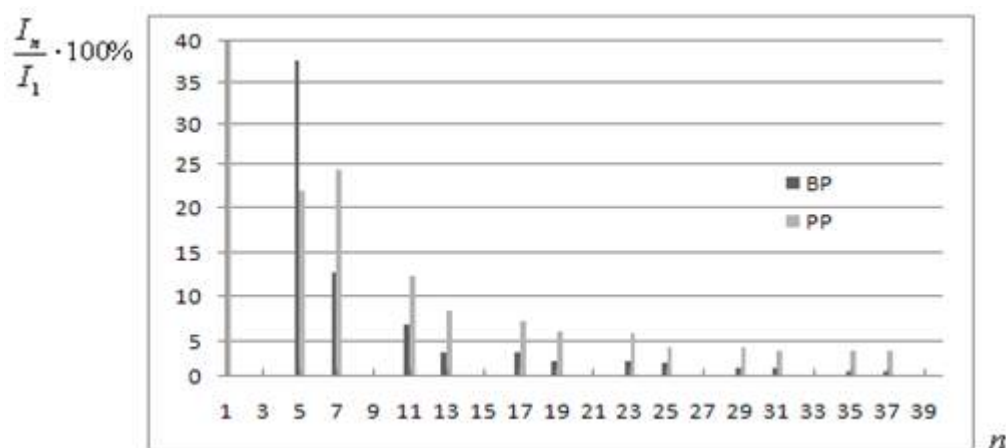


Рисунок 3.13 - Относительные значения высших гармонических фазного тока в ВР и РР: $I_d = 500\text{ A}$ и $I_d = -250\text{ A}$

Значительная величина гармоник фазного тока высоких порядков (7, 11, 13 и т.д.) в РР и ХХ заметно влияет на величину гармоник напряжения сети (рисунок 3.14), существенно ухудшая коэффициент искажения напряжения (K_U). Значения 11-ой и выше, вплоть до 40-ой гармоники, в РР и ХХ

находятся, соответственно, в диапазоне 2,5-2 % и 3,2-1,05% .

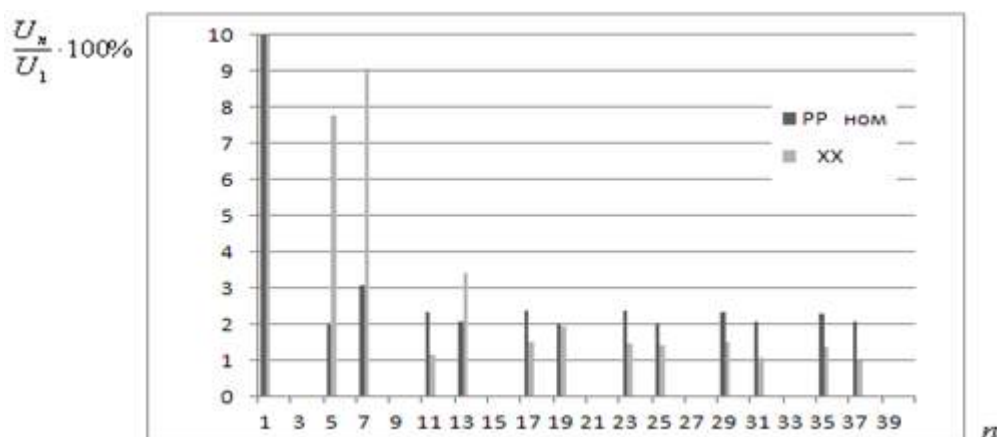


Рисунок 3.14 - Относительные значения высших гармонических напряжения сети в режиме рекуперации и XX

Решение вопроса ЭМС и ПКЭ ПЧ возможно путем установки реактора и (или) фильтро-компенсирующего устройства (ФКУ), состоящего из резонансных (LC) фильтров. Использование ФКУ позволяет решить вопрос ЭМС при меньшем напряжении КЗ входного реактора. Учитывая разные значения амплитуд высших гармоник в РП и РР, ФКУ должен иметь сложную структуру с несколькими ступенями, включение которых происходит в зависимости от режима работы крана.

Для обеспечения требований по ЭМС с сетью были проведены исследования СЭК с использованием шин переменного тока при изменении $U_{кз}$ в диапазоне 1,61 % ÷ 7,6 (3,1 + 4,5-реактор) %. Результаты исследований представлены на рисунке 3.15. За условную единицу принято значение номинального тока инвертора в РП: $I_d = I_i = 500$ А.

Анализ рисунка 3.15 показывает благоприятное влияние индуктивности на THD_I и K_U при всем диапазоне изменения тока нагрузки. Наблюдается уменьшение THD_I для пунктов подключения кранов с $U_{кз} = 1,61$ % и $U_{кз} = 3,1$ %, с 62(70) % до 40(42) % в ВР и РР соответственно.

Улучшение значения THD_I в номинальных и близких к ним режимах происходит на 30-40 %. При использовании 4,5 % - реактора ($U_{кз} = 7,6$ %) значение THD_I составляет 27 %-28 % – в ВР и РР.

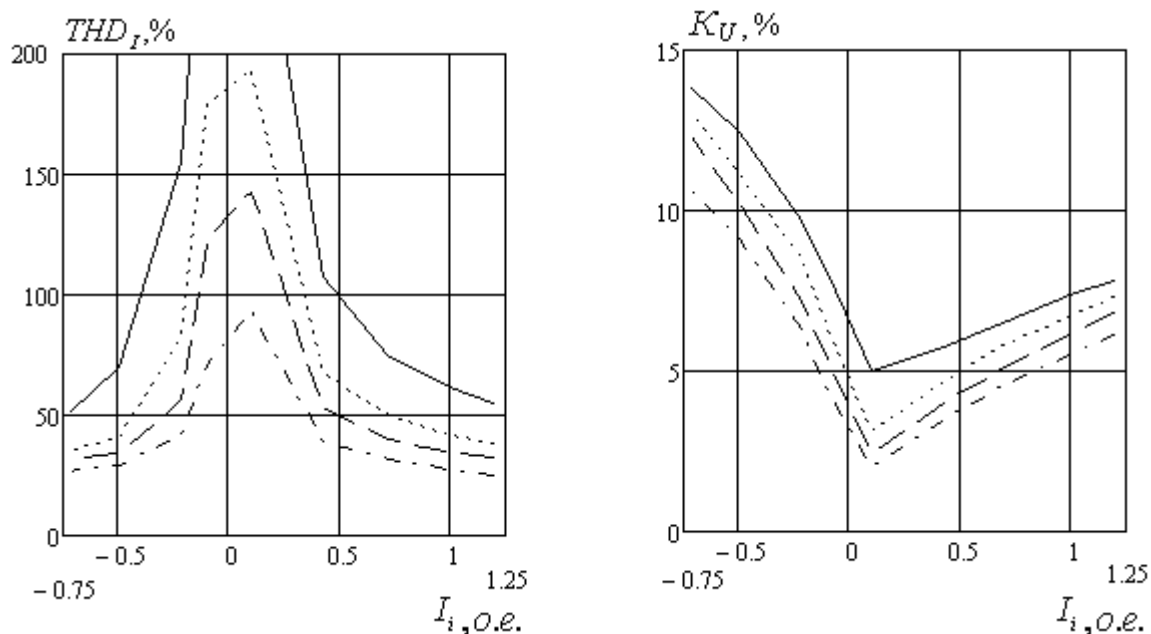


Рисунок 3.15 – Зависимость THD_I фазного тока и K_U напряжение от I_i ,
при $U_{кз} = \text{const}$

(-) - $U_{кз}=1,61\%$, ($\cdots$) - $U_{кз}=3,1\%$, (---) - $U_{кз}=4,6(3,1+1,5)\%$; (- · -) - $U_{кз}=7,6(3,1+4,5)\%$

При снижении нагрузки выявлена особенность работы АВ с двухсторонней проводимостью, которая заключается в увеличении значения THD_I , достигающего максимального значения (более 200 %) в режиме ХХ за счет 5, 7 гармоник и гармоник более высоких порядков.

В ВР значения K_U меньше 8 % и отвечают требованиям ГОСТ 13109-97 [24], при изменении $U_{кз}$ в диапазоне 1,61-7,6 %. При номинальном значении тока РР ($I_i = 0,5$ о.е.), $U_{кз}=1,61$ %, значение K_U составляет 12,5 %, при $U_{кз}=7,6$ % значение K_U уменьшается и составляет 9,1 %.

На базе анализа гармонических составляющих был проведен проверочный расчет потерь мощности в режиме потребления начально-непрерывного тока с учетом значений 5-ой и 7-ой гармоники, как наиболее максимальных.

Потери мощности с учетом выражения (3.10):

$$\Delta P = 3 (I_1^2 R_1 + I_5^2 R_1 K_{\omega 5} + I_7^2 R_1 K_{\omega 7} \dots I_n^2 R_1 K_{\omega n}) \quad (3.17)$$

Учет только 5 и 7 гармоник показывает, что потери мощности в СЭК, выполненной шинами, при номинальном токе возрастают в 1,18 раза.

Значение потерь мощности в троллейных линиях с учетом значений высших гармоник и изменений активных сопротивлений от частоты гармоники увеличивается практически в два раза по сравнению с расчетом потерь мощности в синусоидальных сетях.

Результаты моделирования группы кранов показывают существенное взаимное влияние индуктивности шины при одновременной работе всех ПЧ кранов на электромагнитные процессы. На рисунке 3.16 и 3.17 приведены осциллограммы тока (i_ϕ) на входе каждого ПЧ без реактора при номинальном токе кранов в ВР и РР. Значение индуктивного сопротивления шины составляет 63,81 % от суммарного сопротивления.

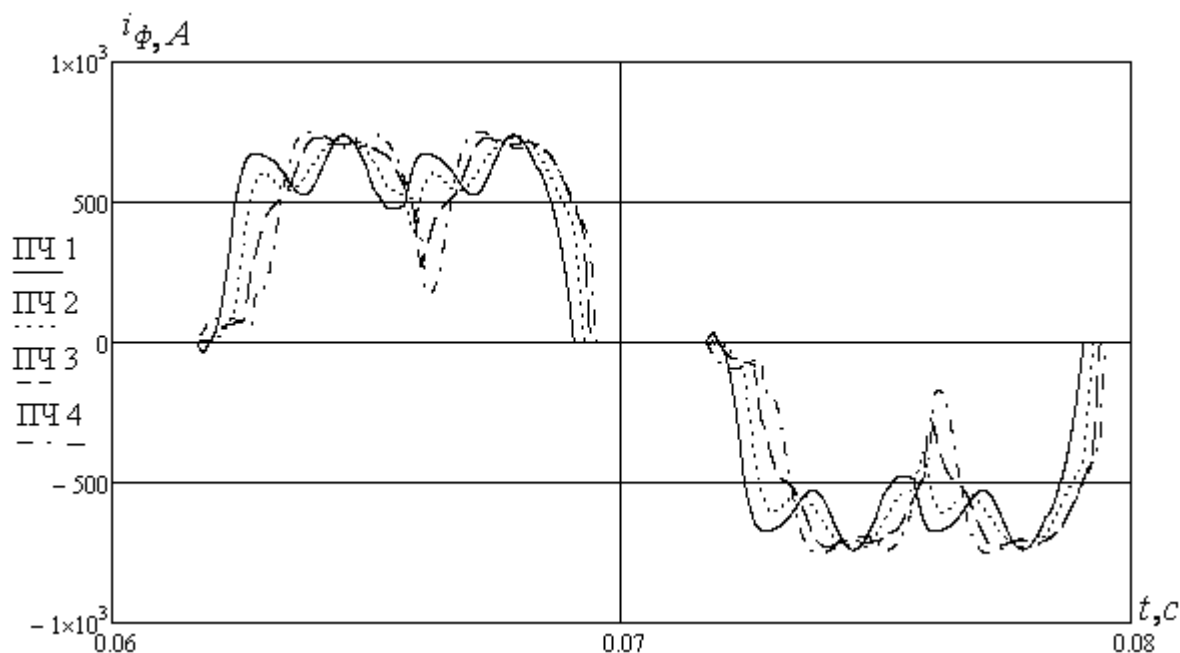


Рисунок 3.16 - Осциллограмма тока (i_ϕ) на входе каждого ПЧ в ВР

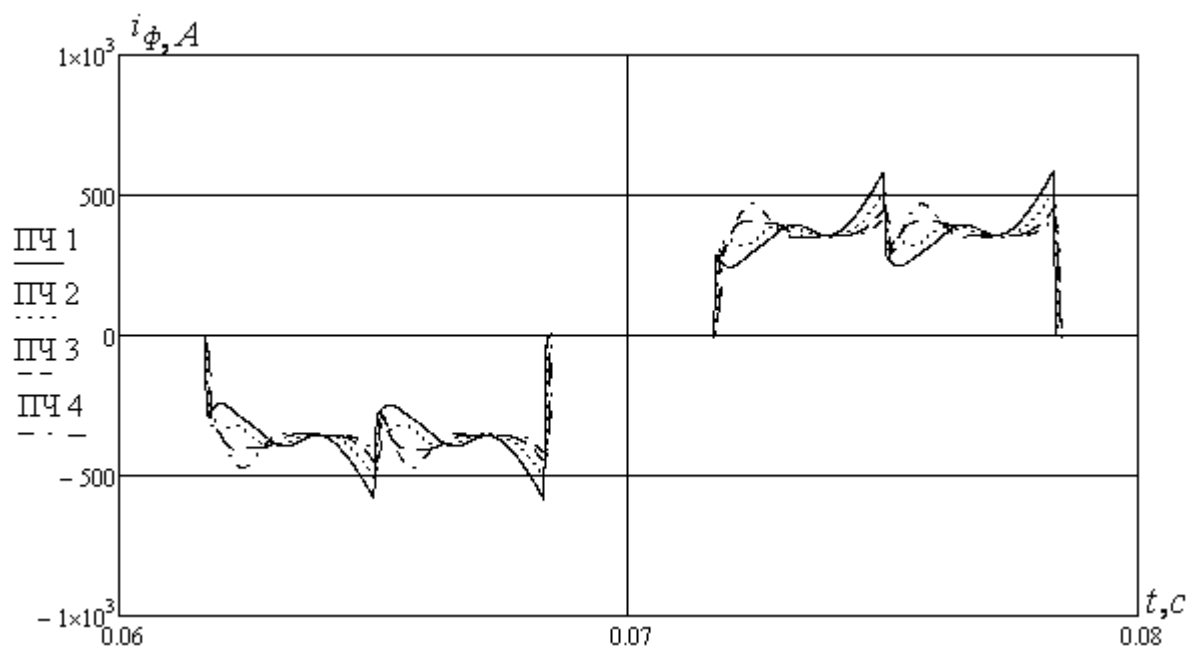


Рисунок 3.17 - Осциллограмма тока (i_{ϕ}) на входе каждого ПЧ в РР

Для рассмотренного случая была построена зависимость THD_I и K_U ПЧ без реактора, и с входным 4,5% - реактором от длины шины переменного тока (l) при номинальном токе всех кранов в ВР (а) и РР (б), рисунок 3.18.

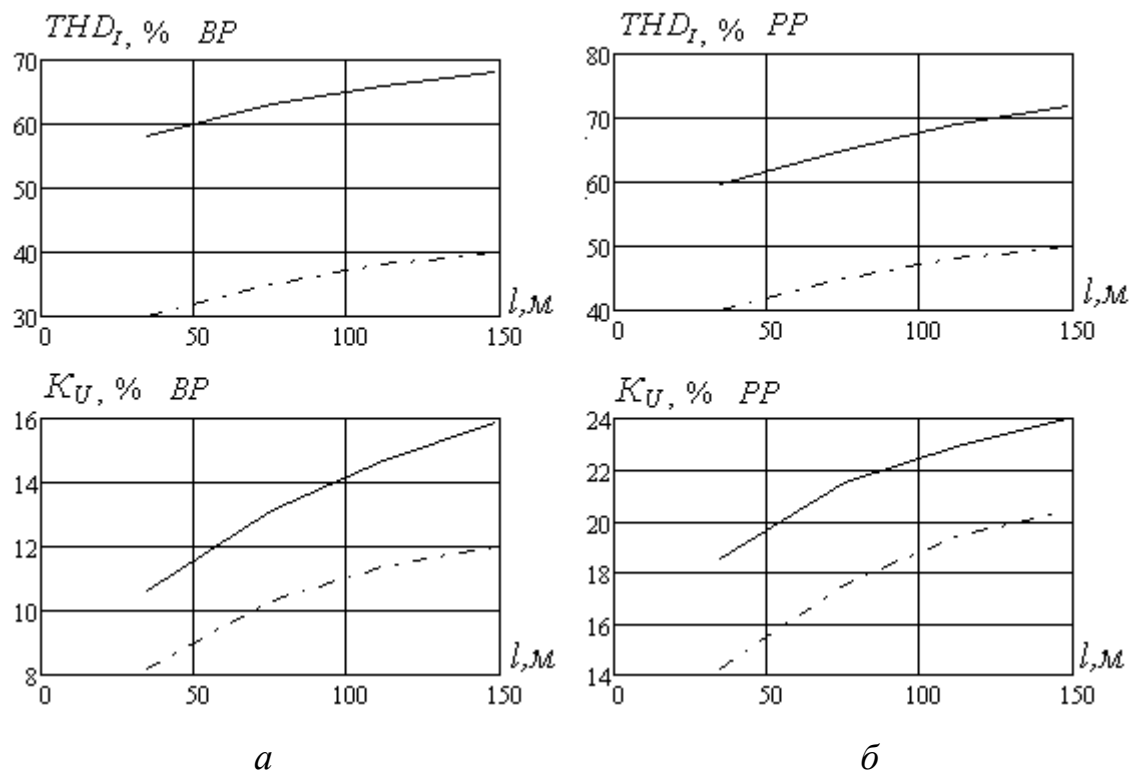


Рисунок 3.18 – Зависимости значения THD_I входного тока и K_U напряжения питания на шине переменного тока в ВР (а) РР (б) от длины шины (l)

(—) - $U_{k3} = 3,1 \%$; (---) - $U_{k3} = 7,6(3,1+4,5) \%$

Анализ зависимости THD_I (рисунок 3.18) показывает, что установка ПЧ без реактора приводит к ухудшению значения THD_I на шине переменного тока, который находится в диапазоне 58 % - 68% в режиме потребления и 60 - 75 % в режиме рекуперации. Установка входного 4,5%- реактора, приводит к улучшению THD_I до значений 30 - 40% в ВР, и до 40 -50 % в РР, что меньше требований стандартов [120, 124] в ВР.

Значения K_U напряжения питания на шине переменного тока без реактора изменяются в диапазоне 11-16 % в ВР и 17-24 % в РР. При установке входного 4,5 % - реактора значение K_U составляет 9-12 % в ВР и 14-21 % в РР, что превосходит предельно-допустимое значение 12 % [24].

Зависимости коэффициента сдвига $\cos \varphi$ фазного тока и потери напряжения на основной и высших гармониках (ΔU_1 , ΔU_5 , ΔU_7) , рассчитанными по (3.18) в зависимости от длины шины переменного тока (сечением $2(120 \times 10 \text{ мм}^2)$), в режиме потребления ($I_1 = 1600 \text{ А}$), представлены на рисунке 3.19.

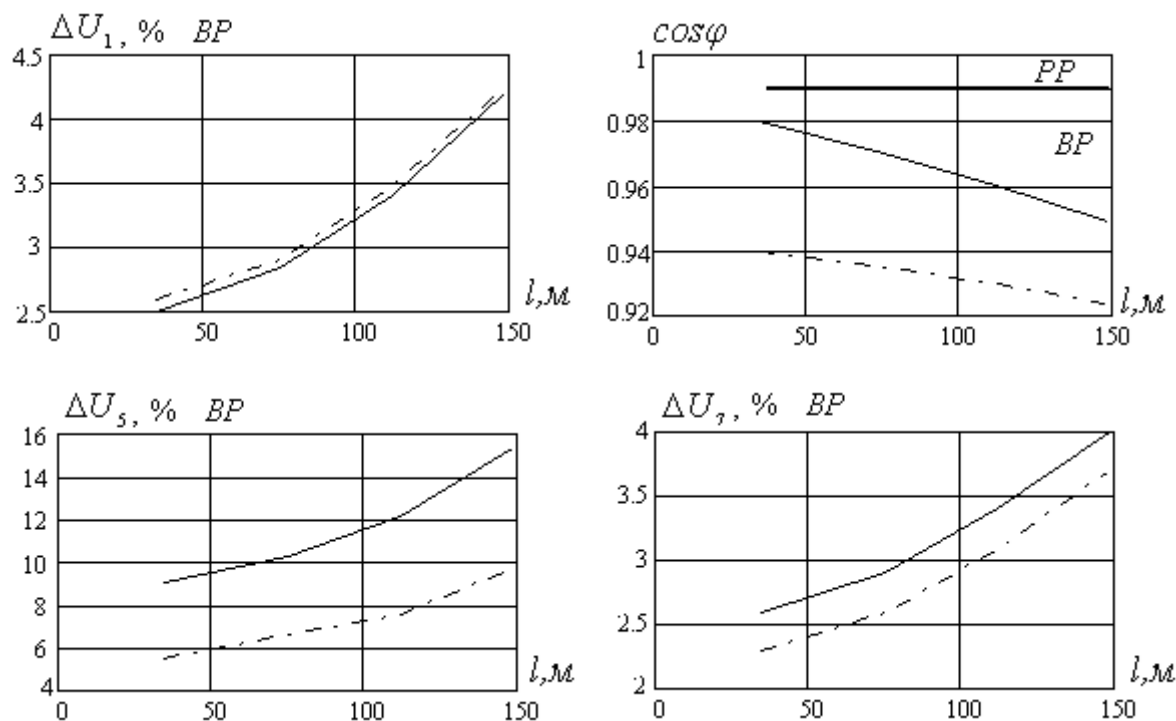


Рисунок 3.19 – Зависимость значений $\cos \varphi$ фазного тока и потери напряжения: ΔU_1 , ΔU_5 , ΔU_7 от длины шины (l), при $U_{k3} = \text{const}$

(—) - $U_{k3} = 3,1\%$; (---) - $U_{k3} = 7,6(3,1+4,5)\%$

Определение потери напряжения при наличии высших гармоник производилось по выражению [30]:

$$\Delta U = \sqrt{\Delta U_1^2 + \Delta U_5^2 + \Delta U_7^2 + \dots \Delta U_n^2} \quad (3.18)$$

где ΔU_n – потери напряжения от высших гармоник;

$$\Delta U_n = \frac{\kappa_{\text{пик}} \cdot I_n \cdot R_{\text{ш(т)}} (\cos \varphi_n + \operatorname{tg} \varphi_{\text{ш(т)}} \cdot \sin \varphi_n)}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%.$$

При $R_{\text{ш(т)}} = \text{const}$, $\operatorname{tg} \varphi_{\text{ш(т)}} n$ растёт пропорционально номеру гармоники (таблица 2.6);

I_n, φ_n – значение фазного тока, угла сдвига n - гармоники.

Значения угла сдвига 1, 5 и 7- гармоники без реактора, $U_{\text{кз}} = 3,1\%$, и с 4,5% - реактором, $U_{\text{кз}} = 7,6(3,1+4,5) \%$, приведены в таблице 3.3

Таблица 3.3 - Значения угла сдвига 1, 5 и 7- гармоники

n	$U_{\text{кз}}, \%$		
		3,1	7,6
1		11,6°	18,2°
5		101,4°	114,8°
7		208,9°	162,8°

Как видно из рисунка 3.19, значение $\cos \varphi$ в ВР уменьшается на 3-4 % при включении 4,5% - реактора за счет увеличения угла коммутации.

Потери напряжения, рассчитанные по (3.18) увеличиваются в 2,6 раза и 2,06 раза относительно ΔU_1 , соответственно, без реактора и с 4,5% - реактором.

Наличие высших гармонических в составе фазного тока приводит к уменьшению граничной длины линии по условию допустимой потери напряжения.

Таким образом, при расчете потери напряжения на переменном токе в шинах и троллейных линиях при использовании ЧРП необходимо проводить проверку с учетом гармонических составляющих и конкретных параметров токопроводов. Отметим, что наиболее существенное влияние на потерю напряжения оказывают 5 и 7 гармоники.

Значения коэффициентов THD_I , K_U , $\cos\varphi$, ν , λ на РУ-0,4кВ представлены в таблице 3. 4 без реактора $U_{кз} = 3,1 \%$ и с 4,5% - реактором, $U_{кз} = 7,6 (3,1+4,5) \%$, при номинальном токе всех кранов в ВР и РР.

Установка входного 4,5 %- реактора обеспечивает приемлемое значение THD_I в соответствии с требованиями стандартов [120, 124] на РУ-0,4кВ в ВР и РР. Значения коэффициентов K_U на РУ- 0,4кВ соответствует нормально-допустимым значением $< 8 \%$, ГОСТ 13109-97 [24] при установке входного 4,5% - реактора в ВР.

Таблица 3.4- Значения коэффициентов THD_I , K_U , $\cos\varphi, \nu$ на РУ-0,4кВ

$U_{кз}$, режим работы		THD_I	K_U	$\cos\varphi$	ν	λ
без реактора, $U_{кз}=3,1\%$	ВР	42,6	8,9	0,96	0,93	0,89
	РР	41,8	14,7	0,9999	0,95	0,981
с 4,5% реактором, $U_{кз}=7,6(3,1+4,5)\%$	ВР	27,6	5,5	0,95	0,96	0,92
	РР	31,5	9,5	0,9994	0,95	0,981

Получение требуемых значений K_U и THD_I на шине переменного тока в выпрямительном режиме, обеспечивается путем применения реактора, индуктивность которого, зависит от конструктивных особенностей СЭК. В режиме рекуперации получение требуемых значений K_U и THD_I вызывает необходимость в проведении дополнительных мероприятий.

3.3 Особенности электромагнитных процессов в системе электропитания кранов постоянного тока

Основной особенностью СЭК постоянного тока является наличие значительной индуктивности токоведущих частей в звене постоянного тока, которая с емкостным фильтром образуют Г-образный фильтр и способствует сглаживанию тока. Исследование электромагнитных процессов в системе питания постоянного тока с троллейным токопроводом выполнялось на примере питания кранов цеха горячей прокатки завода «Запорожсталь».

Исследованы электромагнитные процессы для СЭК постоянного тока со следующими параметрами: $U_\phi = 220$ В, $P_{номПЧ} = 1200$ кВт, $S_{номПЧ} = 1350$ кВА, $U_{кз} = 7,6$ %, $C_\phi = 320 \cdot 10^3$ мкФ на входе инверторов крана. При расстоянии между пунктами подключения кранов 50 - 70 м индуктивность троллейной линии составляет $L_{дт} = 0,36 - 0,51 \cdot 10^{-3}$ Гн, а шины - $L_{дш} = 12 - 16,8 \cdot 10^{-6}$ Гн.

Наличие значительной индуктивности троллейной линии в звене постоянного тока дает положительный эффект, обеспечивая практически прямоугольную форму тока на РУ-0,4кВ трансформатора при номинальном токе кранов в ВР и РР, (рисунки 3.20 и 3.21).

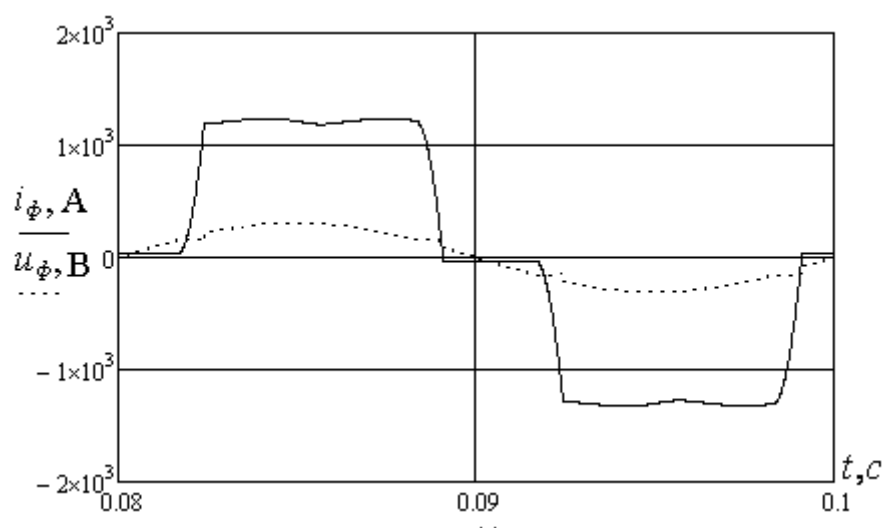


Рисунок 3.20 - Осциллограмма тока (i_ϕ) и напряжения (u_ϕ) в ВР,

$$U_{кз} = 7,6\%, L_{дт} = 0,36 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

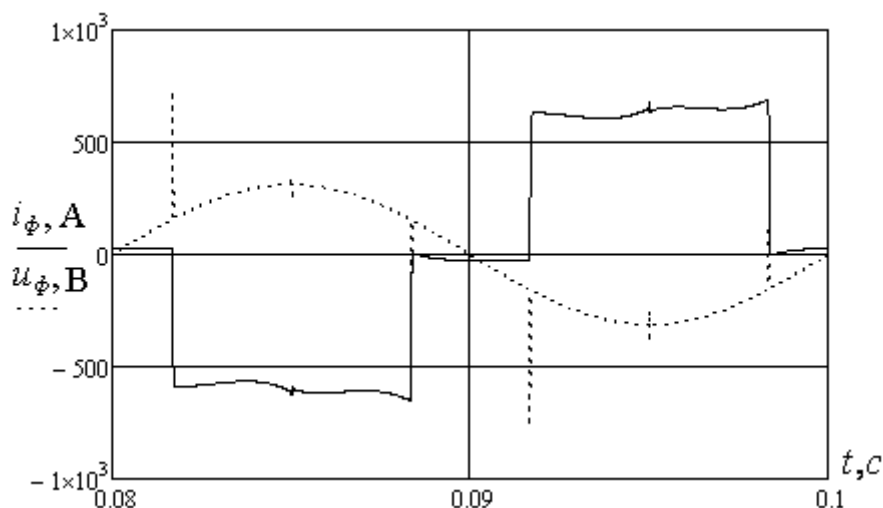


Рисунок 3.21 - Осциллограмма тока(i_ϕ) и напряжения (u_ϕ) в РР,

$$U_{кз} = 7,6 \% ; L_{dT} = 0,36 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

Результаты расчета коэффициентов THD_I , K_U , $\cos\varphi$, ν , λ на РУ-0,4кВ представлены в таблице 3.5 с $U_{кз}=7,6\%$ при номинальном токе всех кранов в ВР и РР.

Таблица 3.5- Значения коэффициентов THD_I , K_U , $\cos\varphi$, ν , λ на РУ-0,4кВ

	THD_I	K_U	$\cos\varphi$	ν	λ
ВР	18,7	5,3	0,93	0,982	0,913
РРТ	19,9	7,9	0,99	0,981	0,981

Анализ результатов таблицы 3.5 показывает, что прямоугольная форма тока обеспечивает ЭМС, удовлетворяющую требованиям стандарта [121]. Значения коэффициентов K_U на РУ- 0,4кВ соответствует требованиям [24].

Индуктивность шины $L_{d ш}$ в 15 раз меньше индуктивности троллейной линии, в связи с этим ток имеет непрерывно-пульсирующий характер на РУ трансформатора. Осциллограммы тока и напряжения на РУ - 0,4 кВ при номинальном токе кранов в ВР и РР представлены на рисунках 3.22 и 3.23.

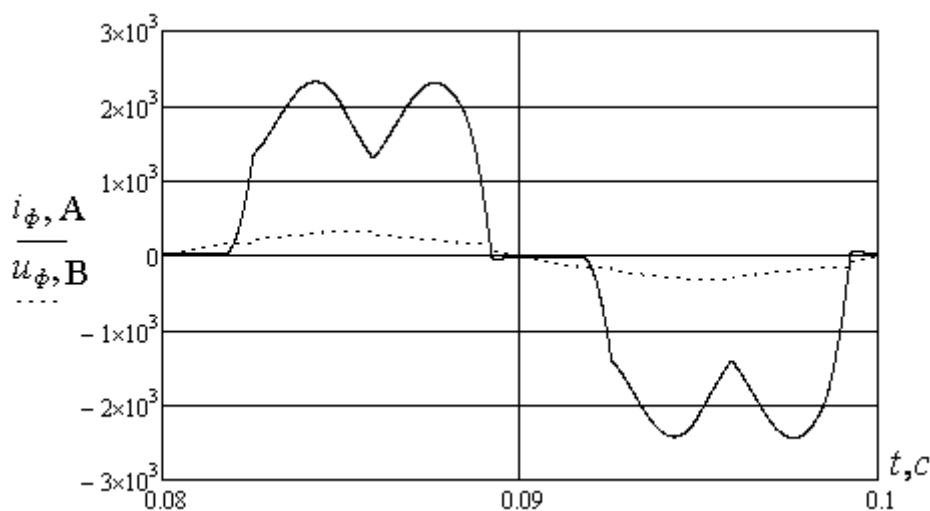


Рисунок 3.22 - Осциллограмма фазного тока i_ϕ и напряжения (u_ϕ) в ВР,

$$U_{кз} = 7,6 \% ; L_{d ш} = 12 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$$

Характер электромагнитных процессов в СЭЖ с шиной постоянного тока в ВР и РР идентичен с характером электромагнитных процессов в системе электропитания с шиной переменного тока.

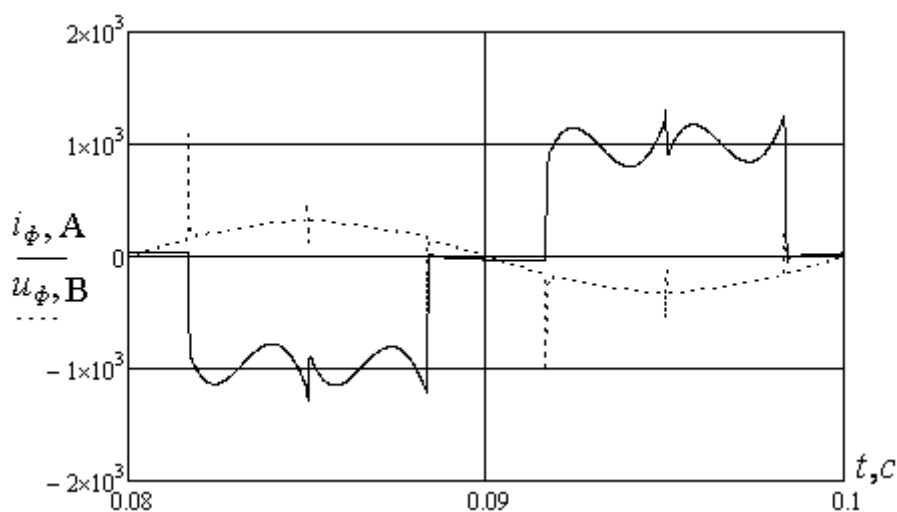


Рисунок 3.23 - Осциллограмма тока i_ϕ и напряжения u_ϕ в РР ,

$$U_{кз} = 7,6 \% ; L_{d ш} = 12 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$$

Результаты расчета коэффициентов THD_I , K_U , $\cos\varphi$, ν , λ на РУ-0,4кВ представлены в таблице 3.6 для ПЧ с $U_{кз} = 7,6 \%$ при номинальном токе всех кранов в ВР и РР.

Таблица 3.6- Значения коэффициентов THD_I , K_U , $\cos\varphi$, ν , λ на РУ-0,4кВ

Режим работы	THD_I	K_U	$\cos\varphi$	ν	λ
ВР, $U_{кз}=7,6\%$	26,5	5,8	0,95	0,96	0,92
РР, $U_{кз}=7,6\%$	30,5	9,3	0,99	0,95	0,981

В связи с небольшой индуктивностью шины постоянного тока значения коэффициентов THD_I , K_U , ν , λ на РУ- 0,4 кВ ухудшаются по сравнению с СЭК постоянного тока, выполненной троллейными линиями. Значение коэффициента K_U не соответствуют нормально-допустимым значением $< 8 \%$ ГОСТ 13109-97 [24] в режиме рекуперации. Значения коэффициентов THD_I в режиме выпрямления и рекуперации не соответствуют требованиям IEEE 519-1992 [121], но соответствуют требованиям МЭК 61000-3-12:2004, МЭК 61800-3:2012 [124, 120]. Превышения значений K_U и THD_I требуют проведения мероприятий по обеспечению ПКЭ и ЭМС в режиме рекуперации.

Выводы

1) При проведении исследований электромагнитных процессов активного выпрямителя, ключи которого управляются импульсом длительностью 120° , синхронизированным с работой соответствующих диодов и обеспечивающих двухстороннюю проводимость, было впервые установлено:

- активный выпрямитель в режиме рекуперации имеет отстающий коэффициент мощности, что связано с влиянием падения напряжения на активном сопротивлении фазы, которое сдвигает момент коммутации на угол до 6° в сторону отставания при использовании троллейных линий в СЭК переменного тока,

- среднее значение тока при работе выпрямителя в режиме начально-непрерывного тока в 1,91 раза больше, чем при рекуперации и определяется отношением разности мгновенных значений напряжения сети и напряжения на конденсаторе фильтра.

2) Для режима начально-непрерывного тока активного выпрямителя получено аналитическое соотношение позволяющее определить амплитуды высших гармоник. В результате установлено, что в гармоническом составе существенно возрастает 5-ая гармоника, амплитуда которой равняется половине амплитуды основной гармоники.

3) Исследования, проведенные на имитационной модели СЭК с ЧРП переменного и постоянного тока с АВ с двухсторонней проводимостью, показали:

- наличие высокочастотных составляющих в фазном токе АВ с двухсторонней проводимостью с гармониками 5, 7 и выше, которые ухудшают значение THD_I при токах нагрузки $(0-0,3) I_{ном}$ до 200% и более, что вызывает необходимость разработки рекомендаций по построению систем управления ключами активного выпрямителя для повышения показателей качества электроэнергии и электромагнитной совместимости в режимах ХХ и близких к нему;

- подтверждение с достаточной точностью (4,2 %) аналитических выражений для определения соотношения средних значений токов при выпрямлении и рекуперации в режиме начально-непрерывного тока;

- подтверждение с достаточной точностью (до 9,5 %) аналитических выражений для расчета амплитуд высших гармоник в режиме выпрямления при начально-непрерывном токе.

4) Установлено, что построение СЭК на постоянном токе существенно изменяет характер электромагнитных процессов, поскольку индуктивность токопровода имеет значительную величину и выполняет роль сглаживающего реактора в звене постоянного тока, что приводит к существенному изменению ПКЭ и ЭМС на РУ-0,4кВ. Показано, что

значительная индуктивность троллейной линии СЭК $0,2-0,4 \cdot 10^{-3}$ Гн в режиме выпрямления и рекуперации формирует практически прямоугольный фазный ток, что обеспечивает приемлемые ПКЭ и ЭМС.

5) В СЭК постоянного тока, выполненной шинами, которые обладают сравнительно меньшей индуктивностью по отношению к троллейным линиям (в 10-15 раз) ухудшаются ПКЭ и ЭМС, поэтому необходимо проводить дополнительные мероприятия по их улучшению.

6) Установлено, что наличие высших гармонических (5 и 7) в кривой фазного тока приводит к увеличению потерь мощности в троллейных линиях практически в два раза, что связано с увеличением активного сопротивления троллейных линий для каждой из гармонических составляющих.

7) Показано, что потеря напряжения в СЭК с шиной переменного тока из-за наличия высших гармонических составляющих возрастает в 2,6 раза без сетевого реактора и 2,06 раза с 4,5% сетевым реактором, по сравнению с известной методикой. Указанные факты вызывают необходимость в проверочных расчетах потерь мощности и напряжения с учетом высших гармонических в СЭК с ЧРП.

8) Установлено, что при работе группы кранов ухудшаются общие показатели ЭМС за счет взаимного влияния их друг на друга через токопровод. Установка 4,5% сетевого реактора улучшает ПКЭ и ЭМС на РУ-0,4кВ трансформатора, а также практически исключает взаимное влияние.

4. РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КРАНОВ С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ПРИВОДОМ

В разделе 3 были проведены исследования электромагнитных процессов в режимах выпрямления и рекуперации энергии переменного и постоянного тока. Выявлен ряд особенностей, приводящих к снижению эффективности СЭК по критерию ЭМС, потере напряжения и мощности. Несмотря на то, что результаты исследований разделов 2 и 3 говорят о преимуществах СЭК с ЧРП на постоянном токе, которая качественно и количественно улучшает ряд показателей, все же в полной мере не решают всех вопросов, связанных с выполнением требований по ЭМС.

С учетом изложенного необходимо уточнить методологию выбора системы питания кранов и обосновать рекомендации, направленные на повышение эффективности СЭК с ЧРП при обеспечении ПКЭ и ЭМС.

4.1 Методология выбора системы питания кранов с частотно-регулируемым приводом

Использование ЧРП кранов с двухзвенными преобразователями частоты позволяет реализовать СЭК на постоянном и переменном токе.

СЭК на постоянном токе наиболее целесообразно использовать при проектировании новых цехов или реконструкции используемых СЭК на ЧРП.

СЭК на переменном токе используется при частичной модернизации крановых установок.

При выборе системы питания кранов исходными данными является расчетная мощность СЭК, которая зависит от числа ЭП, коэффициента использования и коэффициента максимума или расчетного коэффициента.

Расчетная мощность является исходной при выборе установленной мощности трансформаторов и сечении токопроводов.

Во втором разделе был получен относительный коэффициент расчетных мощностей, также показано, что относительные значения коэффициента максимума и расчетного коэффициента практически одинаковые при $n_{эф\sim} > 3$.

Методология выбора СЭК состоит в следующем:

1) производится определение расчетной мощности методом расчетных коэффициентов [90];

2) определяется относительный коэффициент расчетных мощностей $P^*_{расч}$, выражение (2.9). При $n_{эф\sim} \leq 3$ и $k_{исп} < 0,3$ значение $P^*_{расч}$ уточняется путем учета отклонения коэффициентов Δk^* , рисунок 2.5 в;

3) выбирается сечение токопровода переменного тока и допустимая плотность тока по нагреву в зависимости от используемого материала токопровода;

4) выбирается относительная плотность тока в зависимости от сечения шин либо троллейных линий и определяется относительный коэффициент сечений по нагреву $S_{ш(т)}$, выражение (2.14).

5) определяется относительный коэффициент сечений по условию допустимой потери напряжения, выражение (2.27). При этом коэффициент мощности $\cos \varphi = \lambda = \nu \cdot \cos \varphi_1$.

где $\cos \varphi_1 = \cos(\gamma/2)$ - коэффициент сдвига по первой гармонике. Угол коммутации (γ) определяется из соотношения (3.1);

ν - коэффициент искажения, который определяется из соотношения

$$\nu = \frac{1}{\sqrt{1+THD_I^2}}.$$

Для обеспечения нормируемого значение коэффициента гармоник фазного тока THD_I в соответствии с требованиями стандартов [120,124] или [121] предполагается использования ряд мероприятий по выполнению требований [120,124] или [121];

6) определяется $l_{гр}$ для выбранного сечения $l_{гр} \geq l_{расч}$;

7) определяется относительный коэффициент потерь мощности в шинах или троллейных линиях по выражению (2.30), значение $\cos \varphi$ для СЭК переменного тока рассчитано в пункте 5;

8) определяется уровень допустимого гармонического состава по [120, 124] или [121] и производится проверочный расчет потери напряжения и потерь мощности с учетом значений высших гармонических составляющих и производится окончательный выбор сечений токопроводов СЭК переменного тока. При невыполнении требований стандартов [120, 124] или [121] предлагаются мероприятия по улучшению ПКЭ и ЭМС;

9) методика выбора выпрямителя для СЭК постоянного тока аналогична выбору выпрямителя для кранов с СЭК переменного тока, где используется общая шина постоянного тока для питания инверторов. Особенностью является то, что в СЭК постоянного тока обмен энергией происходит не только в пределах крана, но и между кранами. Учитывая, что ток рекуперации одного крана не может быть более $0,5I_{\text{ном}}$, то при работе n -кранов вероятность рекуперации энергии в сеть еще меньше из-за обмена между кранами. При относительно малом токе рекуперации может оказаться более экономически выгодным вместо рекуперативного выпрямителя воспользоваться устройством динамического торможения или отдельным поглотителем энергии.

С экономической точки зрения общий выпрямитель имеет меньшую стоимость, габариты и массу по сравнению с n – выпрямителями одинаковой суммарной мощностью.

Для улучшения ПКЭ и ЭМС с сетью и исключения взаимного влияния кранов в СЭК переменного тока целесообразно устанавливать дополнительно сетевой реактор с $U_{\text{кз}}=4,5\%$.

ПКЭ и ЭМС с сетью в СЭК постоянного тока выполненной троллейными линиями обеспечиваются при использовании 6-пульсной схемы выпрямления. Обеспечение ПКЭ и ЭМС с сетью в СЭК постоянного тока, выполненной шинами, требует разработки ряда мероприятий.

В СЭК переменного тока необходимость установки выпрямителя с рекуперацией определяется на основе технико-экономического расчета. В случае установки выпрямителя с рекуперацией наиболее целесообразные варианты АВ с ШИМ – модуляцией и коррекцией коэффициента мощности или АВ с двухсторонней проводимостью в зависимости от требований к THD_I . При этом следует иметь в виду, что реализация АВ с ШИМ – модуляцией и коррекцией коэффициента приводит к увеличению установленной мощности оборудования и дополнительным потерям мощности, а следовательно и стоимости, что относится к его недостаткам:

- для реализации коэффициента мощности примерно равным единицы и синусоидальным входным током необходимо на входе ПЧ установить реактор с $U_{кз} \approx 29 \div 40 \%$;

- напряжение в звене постоянного тока должно находиться в пределах 700-800 В, что при использовании IGBT-транзисторов 12 класса приводит к снижению коэффициента запаса по напряжению до 1,5 и снижает надежность ПЧ. Использование IGBT-транзисторов 17 класса приводит к увеличению стоимости;

- увеличение амплитуды напряжения до 700-800 В при ШИМ – модуляции приводит к ухудшению работы изоляции серийных двигателей, напряжением 380В, что требует увеличения их напряжения до 660 В или разработки специальных двигателей;

- увеличение $U_{кз}$ и напряжения в 1,3÷1,5 раза в звене постоянного тока приводит к увеличению потерь во всех элементах ЧРП, а следовательно к ухудшению его КПД и увеличению установленной мощности силовых элементов.

В АВ с двухсторонней проводимостью для улучшения ПКЭ и ЭМС необходимо устанавливать сетевой реактор с $U_{кз} \approx 4,5 \%$. При использовании АВ с двухсторонней проводимостью напряжение в звене постоянного тока находится на уровне 500-540 В, что при IGBT-транзисторов 12 класса

обеспечивает запас по напряжению более чем в 2 раза и снижает уровень коммутационных потерь ($>1,5$ раза).

Таким образом АВ с двухсторонней проводимостью имеет меньшую установленную мощность оборудования и соответственно себестоимость.

4.2 Рекомендации по повышению эффективности системы электропитания кранов переменного тока

Результаты исследований, приведенные в разделе 3, показали, что включение реактора на входе ПЧ улучшает ПКЭ и ЭМС. Для распространенной в настоящее время СЭК переменного тока индивидуальные решения по улучшению ЭМС приводят к необходимости установки «синус»-фильтров [40, 125, 128], что в свою очередь удорожает ЧРП кранов. При реализации СЭК с несколькими кранами удорожание проявляется в большей степени, но до конца не решает проблему ЭМС, так как фильтр эффективно работает при токе более $0,5 I_{ном}$. Поэтому для группы кранов устанавливают дополнительные устройства фильтрации и стабилизации напряжения.

Одним из отрицательных моментов активного выпрямителя с двунаправленной проводимостью является наличие в фазном токе высокочастотной составляющей частотой 250, 350 Гц и т.д. в режиме ХХ.

Для исключения генерации высших гармоник в фазном токе в режиме ХХ необходимо АВ перевести в режим выпрямителя. Для этого следующий предложен алгоритм. Для АВ, установленного на кране, при нулевом положении контролера транзисторы АВ выключаются. Включение транзисторов производится при переводе контролера в положение определяющее режим рекуперации. При этом должно выполняться условие $U_d \geq U_{Cf \max}$. Для СЭК постоянного тока момент включения транзисторов определяется только при соблюдении соотношения $U_d \geq U_{Cf \max}$.

Решение вопроса улучшения ЭМС СЭК переменного тока в режимах выпрямления и рекуперации усложняется тем, что эти режимы отличаются величинами гармонических составляющих. В ВР преобладает пятая гармоника, а в РР – седьмая. Решение этой проблемы традиционными ФКУ не представляется возможным, так как нарушается баланс реактивной мощности на разных частотах для указанных режимов работы АВ. Решение проблемы возможно установкой широкополосного (UHF)-фильтра, что усложняет не только ФКУ, но и выбор ее параметров при резко-переменной нагрузке.

Для повышения THD_I АВ в режиме рекуперации предлагается использовать импульсное формирование тока. В этом режиме формируется прямоугольный фазный ток, имеющий теоретический $v=0,96$. Фрагмент модели, имитирующий указанный режим, показан на рисунке 4.1.

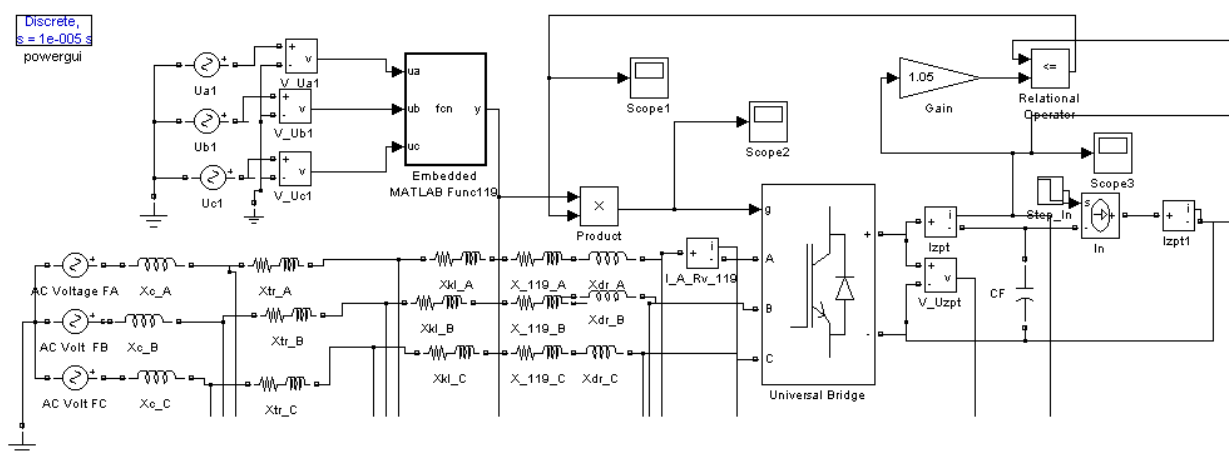


Рисунок 4.1- Фрагмент модели с импульсным формированием тока

При этом формирование амплитуды фазного тока происходит в функции среднего тока звена выпрямления. Амплитуда пульсаций определяется порогом чувствительности датчика и фазной индуктивностью СЭК. Частота пульсаций определяется из соотношения $f = \Delta U / L_\phi \Delta I$,

где ΔI - порог чувствительности датчика,

ΔU - разность напряжений на конденсаторе фильтра и линейного

напряжения сети.

Осциллограмма фазного тока, полученная в результате моделирования (а) и путем проведения эксперимента (б) с импульсным формированием тока в РР, представлена на рисунке 4.2.

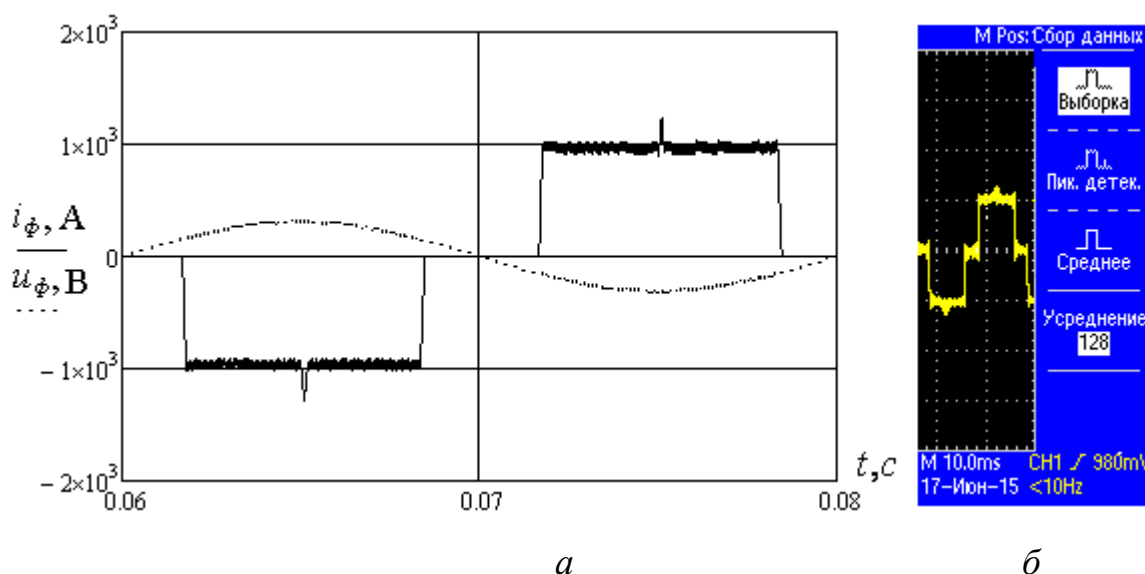


Рисунок 4.2 - Осциллограмма фазного тока i_ϕ на модели (а),
экспериментальная (б) в РР

Эксперимент проводился для АВ с двухсторонней проводимостью в электроприводе типа МПЧ – ТТП – 160 – 380 – 50 УХЛ 4. Анализ реальной осциллограммы показывает работоспособность импульсного формирования тока.

Электропривод МПЧ – ТТП – 160 – 380 – 50 УХЛ 4 предназначен для согласованного вращения асинхронных двигателей с фазным ротором, который выполнен по схеме асинхронного вентильного каскада с импульсным регулятором суммарного тока ротора. Рекуперация энергии обеспечивается АВ с двухсторонней проводимостью. Параметры АВ с двухсторонней проводимостью : $I_{ном} = 160$ А, $U_{ном} = 380$ В, перегрузка по току 1,5, на входе инвертора установлен токоограничивающий 4,5 %- реактор.

Испытания проводились на стенде ООО НИИ «Преобразователь» в

статическом режиме. Ток нагрузки в режиме рекуперации $I_i = - 100$ А.

Значения коэффициентов THD_I , K_U , $\cos\varphi$, ν , λ на РУ-0,4 кВ представлены в таблице 4.1 для ПЧ с $U_{кз}=7,6\%$ при номинальном токе всех кранов в РР для рисунка 4.2 (а).

Таблица 4.1- Значения коэффициентов THD_I , K_U , $\cos\varphi$, ν , λ на РУ-0,4 кВ

Режим работы	THD_I	K_U	$\cos\varphi$	ν	λ
РР, $U_{кз}=7,6\%$	20	4,3	0,999	0,98	0,981

Значения коэффициентов THD_I и K_U на РУ- 0,4 кВ соответствует требованиям стандарта IEEE 519-1992 [121] и ГОСТ13109-97 [24] .

4.3 Рекомендации по повышению эффективности системы электропитания кранов постоянного тока

В разделе 3 было показано, что наличие в звене постоянного тока индуктивности, определяемой индуктивностью токопроводов, позволяет существенно улучшить ПКЭ и ЭМС с питающей сетью. В связи с этим для токопровода реализованного троллейной линией практически не требуется дополнительных мероприятий.

Отметим, что установка общего выпрямителя для крановых установок существенно дешевле, чем установка нескольких выпрямителей одинаковой суммарной мощности. Установка общего выпрямителя для крановых установок с ЧРП способствует уменьшению стоимости крановых приводов. Для СЭК с малыми значениями индуктивности токопровода в РР применяется импульсное ограничение тока. В ВР применяются стандартные способы улучшения ЭМС [78]. Поскольку увеличение индуктивности в звене выпрямления до 0,3 мГн приводит к приемлемым показателям ЭМС, то целесообразно рассмотреть возможность использования фильтровых

дросселей типа ФРОС с индуктивностью 0,2 мГн на токи 500-1000 А. Установка дополнительного фильтрового дросселя приводит к увеличению габаритов и стоимости. Вес реактора ФРОС индуктивностью 0,2 мГн на ток 500А достигает 500 кг.

Другим альтернативным способом улучшения ЭМС является увеличение пульсности выпрямителя до 12, 18 в зависимости от суммарной мощности крановых установок. Отметим, что данный способ для СЭК переменного тока существенно удорожает стоимость оборудования для крановых установок с ЧРП. В СЭК постоянного тока использование многопульсного выпрямителя на РУ-0,4 кВ приводит к существенно меньшим капитальным затратам по сравнению с СЭК переменного тока. Увеличение стоимости трансформатора происходит на 15-20 % при использовании 12-пульсного выпрямителя в СЭК постоянного тока по сравнению трансформатором для 6-пульсного выпрямителя, но в связи с уменьшением расчетной мощности трансформатора (рисунок 2.5 з) существенного изменения цены не происходит.

На рисунках 4.3 и 4.4 представлены осциллограммы фазного тока и напряжения при использовании 12- пульсной схемы выпрямления.

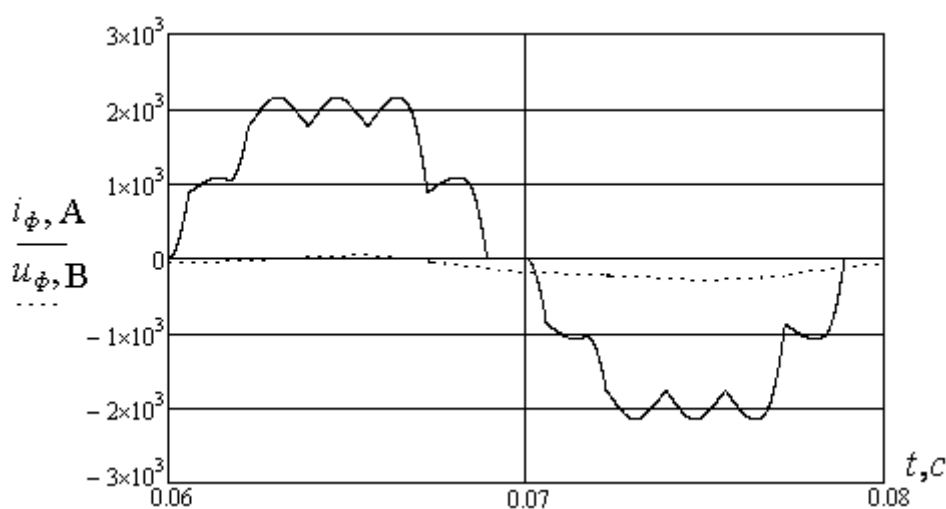


Рисунок 4.3 - Осциллограмма тока i_ϕ и напряжения (u_ϕ) в ВР, 12-пульсная схема, $U_{кз}=7,6\%$; $L_d=12\cdot10^{-6}$ Гн

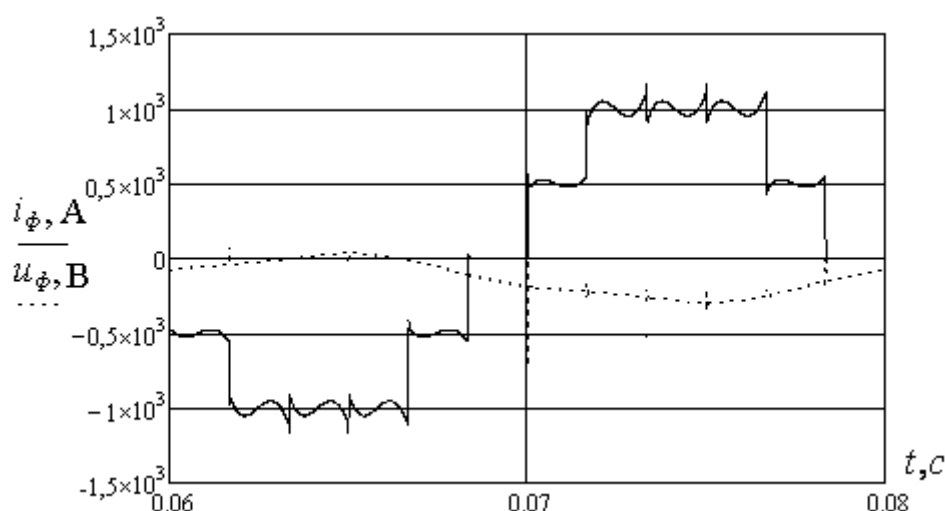


Рисунок 4.4 - Осциллограмма тока i_ϕ и напряжения (u_ϕ) в РР, 12-пульсная схема, $U_{кз} = 7,6 \%$; $L_d = 12 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$

Применение последовательного соединения мостов АВ с двухсторонней проводимостью при использовании 12-пульсной схемы позволяет использовать низковольтные IGBT-модули с высокой частотой модуляции и имеющие малое (до 1,2 В) падение напряжения. Параллельное соединение мостов требует установки уравнительного реактора и приводит к появлению высокочастотных составляющих от уравнительного тока в фазном токе в режиме ХХ, поэтому параллельное соединение не целесообразно.

Значения коэффициентов THD_I , K_U , $\cos\varphi$ на РУ-0,4 кВ представлены в таблице 4.2 для ПЧ с $U_{кз} = 7,6\%$ при номинальном токе всех кранов в ВР и РР.

Таблица 4.2- Значения коэффициентов THD_I , K_U , $\cos\varphi$ на РУ - 0,4 кВ

Режим работы	THD_I	K_U	$\cos\varphi$	ν	λ
ВР, $U_{кз}=7,6\%$	16,92	4	0,93	0,98	0,91
РР, $U_{кз}=7,6\%$	19,8	7,9	0,99	0,98	0,98

Анализ данных таблицы 4.2 показывает, что значения ПКЭ и ЭМС соответствует требованиям [121,120,124] и [24] в ВР и РР.

Представляет интерес возможность использования известных аналитических соотношений для определения коэффициента искажения напряжения [36, 93]:

$$K_U = \frac{1}{S_{K3}} \sqrt{\frac{P_{ном} Q_{ном}}{U_{K3}} - S_{ном}^2} \quad (4.1)$$

$$K_U = \frac{P_{ном}}{S_{K3}} \sqrt{\frac{2\pi}{m U_{K3}} - 1} \quad (4.2)$$

где S_{K3} – мощность КЗ на шинах 0,4кВ, $S_{K3} = \frac{\sqrt{3} \cdot (U_{ном})^2}{Z_{\Sigma}}$, кВА;

$U_{ном}$ – номинальное напряжение В,

Z_{Σ} – сопротивление системы питания кранов, мОм,

U_{K3} – напряжение КЗ трансформатора, приведенное к базисной мощности, о.е. Учитывая, что U_{K3} не превосходит 10-15 % , возможна замена параметра U_{K3} на угол коммутации γ при выпрямлении [93].

$P_{ном}, Q_{ном}, S_{ном}$ – активная, реактивная и полная мощность выпрямителя, соответственно, кВт, кВАр, кВА.

m – количество пульсов, $m=6$ – для мостовых схем, $m=12$ – для 12-ти импульсных схем.

В таблице 4.3 приведены значения K_U при моделировании (M) и при расчете в соответствии с формулами (Φ) (4,1;4.2).

Таблица 4.3- Значения K_U СЭК с шиной постоянного тока

Режим работы		Мостовая	погрешность	12-импульсная схема	погрешность
ВР	$K_U (M)$	5,4	-	4	-
	$K_U (\Phi \text{ 4.1})$	5,9	8,5%	-	-
	$K_U (\Phi \text{ 4.2})$	6,1	11,5%	4,5	11%

Продолжение таблицы 4.3.

РР	$K_U(M)$	9,3	-	7,9	
	$K_U(\Phi 4.1)$	10,3	9,7%	-	-
	$K_U(\Phi 4.2)$	10,5	11,4%	8,7%	9%

Анализ таблицы 4.3 показывает, что для предварительной оценки K_U в режиме выпрямления выражение (4.1) дает более точный результат для мостовой схемы. Погрешность составляет до 9,7 %. Для оценки K_U в режиме рекуперации для 12-пульсной схемы более приемлемый результат дает выражение (4.2). Погрешность составляет 9 - 11 % в сторону увеличения по сравнению с моделированием, что приемлемо для практических расчетов оценки ПКЭ. Выражение (4.1) не приемлемо для 12-пульсных схем, так как было предложено для 6-пульсных.

Выводы

1) Проведенный анализ показал, что повышение эффективности системы СЭК с ЧРП обеспечивается при использовании токопроводов постоянного тока, которые выполнены шинами или троллейными линиями.

2) В качестве источника постоянного тока предлагается использовать АВ с двухсторонней проводимостью. АВ с двухсторонней проводимостью имеет меньшую установленную мощность основных элементов, простую систему управления, относительно жесткую внешнюю характеристику по сравнению с АВ в режиме ШИМ. Указанный АВ был разработан и испытан в ОАО «НИИ Преобразователь». АВ с двухсторонней нашел применение в электроприводе согласованного вращения двигателей механизма передвижения крана типа МПЧ – ТТП – 160 – 380 – 50 УХЛ 4.

3) Для улучшения ЭМС АВ с двухсторонней проводимостью в СЭК переменного тока разработаны рекомендации по построению системы управления транзисторами в режиме ХХ.

4) Для выполнения требований по обеспечению ПКЭ и ЭМС активного выпрямителя с двухсторонней проводимостью в системах питания кранов переменного тока используется импульсное формирование прямоугольного тока в режиме рекуперации.

5) Применение 12-пульсной схемы АВ с двухсторонней проводимостью в СЭК постоянного тока обеспечивает выполнение требований по ПКЭ и ЭМС при реализации систем питания шинами.

6) Использование 6-пульсной схемы АВ с двухсторонней проводимостью в СЭК постоянного тока обеспечивает выполнение требований по ПКЭ и ЭМС при реализации систем питания троллейными линиями, обладающими индуктивностью более $0,2 \cdot 10^{-3}$ Гн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена научно-прикладная задача комплексного исследования СЭК, оснащенных ЧРП с двухзвенными ПЧ, направленная на повышение их эффективности.

1) Повышение эффективности СЭК с ЧРП достигается при использовании систем питания постоянного тока. Разработанный метод по определению относительных коэффициентов сравнительной оценки систем питания постоянного и переменного тока позволил определить повышение эффективности СЭК постоянного тока по сравнению с переменным током. Повышение эффективности достигается за счет снижения расчетной мощности трансформаторов, уменьшения сечения токопроводов по условию нагрева, уменьшения сечения токопроводов либо увеличение граничной длины участка токопроводов по условию допустимой потери напряжения и уменьшения удельных потерь мощности в токопроводах.

2) Разработано математическую модель системы электропитания кранов, которая дает возможность исследовать зависимости показателей качества электроэнергии и электромагнитной совместимости от длины токопровода и значения ПКЭ и ЭМС на РУ-0,4к В трансформатора.

3) В качестве источника постоянного тока предложено использовать АВ с двухсторонней проводимостью, имеющий меньшую установленную мощность основных элементов, простой алгоритм управления, относительно жесткую внешнюю характеристику по сравнению с АВ в режиме ШИМ с коррекцией коэффициента мощности. Разработаны рекомендации по построению системы управления транзисторами АВ с двухсторонней проводимостью, которая обеспечивает улучшение ПКЭ и ЭМС в режиме ХХ и в режиме рекуперации.

4) Показано, что в СЭК с ЧРП постоянного тока, выполненной троллейными линиями, возможно обеспечение показателей ЭМС без дополнительных устройств. Наиболее рациональным способом получения

приемлемых показателей ЭМС в СЭК постоянного тока, выполненной шинами, является использование 12-пульсной схемы АВ с двухсторонней проводимостью.

В СЭК переменного тока для улучшения показателей ЭМС при рекуперации необходимо использовать импульсное формирование прямоугольного тока.

5) Результаты диссертационной работы использованы в ОАО «НИИ Преобразователь» при модернизации выпрямителей с рекуперацией энергии типа ВР – ТППТ – 300 – 0,4 для группового питания автономных инверторов напряжения и для электропривода согласованного вращения механизма передвижения крана с рекуперацией энергии типа МПЧ – ТТП – 160 – 380 – 50 УХЛ 4.

Метод сравнительной оценки СЭК с ЧРП принят к внедрению в ГП «ГИПРОПРОМ» (г. Запорожье).

Рекомендации по использованию СЕК постоянного тока с ЧРП приняты при модернизации кранов в цехе горячей прокатки ОАО «Запорожсталь» (г. Запорожье).

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Авдеев И. В. Способы улучшения коэффициента искажения сети, питающей частотно- регулируемый электропривод / И. В. Авдеев, В. Л. Прихно, О. В. Немыкина, Ю. А. Иваничкин // Електромеханічні та енергетичні системи моделювання та оптимізації. Зб. наук. праць VIII Всеукраїнської науковотехнічної конференції молодих вчених і спеціалістів Кременчук: КрДУ, 2010.- С.182-185.
2. Алексеев Е. Р. MATLAB 7 / Е. Р. Алексеев, О. В. Чеснокова // М.: НТ Пресс, 2006.- 265 С.
3. Андриенко А. О. Состояние и перспективные направления обновления парка портовых кранов в морских портах Украины / А. О. Андриенко // Вісн. Одеського національного морського університету. Зб. наук. праць. - Одеса: ОНМУ, 2006.-Вип.20.- С. 86-89.
4. Андриенко П. Д. Анализ электромагнитных процессов выпрямительно-инверторного преобразователя на математической модели / П. Д. Андриенко, О. В. Немыкина // Техническая электродинамика. Тематический выпуск. Силовая электроника и энергоэффективность, Ч 1, Киев, 2004, С. 122-125.
5. Андриенко П. Д. Влияние входного LC-фильтра 4 q-S преобразователя на процессы энергообмена в системе «Электропривод-сеть» / П. Д. Андриенко, А. П. Заболотный, О. В. Немыкина // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета.- Днепродзержинск: ДГТУ, 2007. – С.530 – 531
6. Андриенко П. Д. Анализ электромагнитных процессов в электроприводе, построенном на 4Q-S преобразователе / П. Д. Андриенко, А. П. Заболотный, О. В. Немыкина, Д. О. Кравченко // Електроінформ - Львов: ЕКОінформ, 2009. №2-3 - С. 260-262.
7. Андриенко П. Д. Расчёт гармонических составляющих во входной цепи преобразователя частоты со звеном постоянного тока с использованием 4Q-S

преобразователя / П. Д. Андриенко, О. В. Немыкина // Электротехника и электроэнергетика 2003.- №2.- С.47-51.

8. Асинхронные электроприводы двойного питания на базе преобразователей частоты "ЭРАТОН-ФР" / В. А. Отченаш, В. В. Панкратов, В.М. Берестов, В.А.Клан, Д. А. Котин // Труды IV Всероссийской научно-практической конф. "Автоматизированный электропривод и промышленная электроника" АЭПЭ-2010 - Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2010. - С. 106 - 113.

9. Бабакин В. И. Анализ гармонического состава напряжения питающей сети с помощью виртуальной модели высоковольтного частотно-регулируемого асинхронного двигателя / В. И. Бабакин, О. Н. Ивашкин // Нефтяное дело- 2012.- №3.- С. 32-42.

10. Бараненко Т. К. Дослідження імітаційної моделі системи вентильного двигуна у середовищі MATLAB / Т. К. Бараненко, В. Є. Саравас // Вісн. Вінницького політехнічного інституту – 2008.- Вип.6. - С.89-93.

11. Басов Г. Г. Некоторые вопросы повышения эффективности электропередачи пригородного подвижного состава / Г. Г. Басов, Н. И. Фалалеев, О. В. Немыкина // Электротехника та електроенергетика 2003. -№ 1.- С. 51-53

12. Белов М. П. Автоматизированный электропривод – современная основа автоматизации технологических процессов / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассуцов, А. А. Сумников // Электротехника - 2003. - №5. - С. 12-16.

13. Беляев В. Л. Повышение энергетической эффективности в морском торговом порту «Южный» / В. Л. Беляев // Зб. праць VI міжнародної науково-технічної конф. «Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств» - Маріуполь: Вид-во ПДТУ, 2008. – С. 168-171.

14. Браславский И. Я. Математическое моделирование частотнорегулируемого электропривода с емкостными накопителями энергии / И. Я. Браславский, В. Н. Поляков, З. Ш. Ишматов, Ю. В. Плотников,

- А. В. Костылев, Г. З. Эрман // Электроприводы переменного тока: Труды международной 15-й конференции. Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 129 – 134.
15. Булгаков. А. А. Основы динамики управляемых вентильных систем [Текст] : монография / А. А. Булгаков. Ин-т автоматики и телемеханики АН СССР. - Москва: АН СССР, 1963. - 220 С.
16. Бутаев Ф.И. Вентильный электропривод / Ф.И. Бутаев, Е.Л. Эттингер. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1951. – 248 С.
17. Волков А. В. Анализ электромагнитных процессов и совершенствование регулирования активного фильтра /А.В. Волков // Электротехника. - 2002. - №12. - С. 40 - 48.
18. Волков А. В. Компенсация мощности искажений и реактивной мощности посредством активного фильтра с прогнозируемым релейным управлением / А.В. Волков, В.А. Волков // Электротехника.- 2008.- №3.-С. 2-10.
19. Волков И. В. Новая концепция построения силовых цепей частотно-регулируемых асинхронных электроприводов / И. В. Волков // Технічна електродинаміка. 1999.- №4.- С. 21 - 26.
20. Воробьев А. А. Групповое питание электропривода с общин накопителем энергии как новое направление энергосбережения / А. А. Воробьев, А. А. Колб // Проблемы автоматизированного электропривода Вестн. нац. техн. ун-та «ХПИ».- Харьков: НТУ «ХПИ», 2003.- Вип.10.- С. 224 – 228.
21. Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применения / П. А. Воронин.- М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2005. - 384 С.
22. Герасимьяк Р. П. Економічна ефективність використання перетворювачів частоти для кранових механізмів підйому / Р.П. Герасимьяк, С. П. Савич, Л. А. Швець // Електротехнічні та комп'ютерні системи – К.: «Техніка», 2011.- Вип. 3(79) - С. 392-393.

23. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учеб. пособие – СПб.: Корона принт, 2001.-320 С.
24. ГОСТ 13109-97. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Электромагнитная совместимость технических средств. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Издание официальное. Киев: Госстандарт Украины, 1999.- 31С.
25. Гуляев Е. Н. Электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей с сетью и нагрузкой: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: спец. 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» / Е. Н. Гуляев – Уфа,-2010. – 19 С.
26. Гуляев Е. Н. Высшие гармоники в сетях с нелинейной нагрузкой и методы их уменьшения / Е.Н. Гуляев // III Слет молодых энергетиков Республики Башкортостан: Сборник докладов молодежной научно – технической конференции. – Уфа: Издательство «Скиф», 2008 – 624 с. – С. 26-32.
27. Добрусин Л. А. Фильтро-компенсирующие устройства для преобразовательной техники / Л.А. Добрусин .-М.: НТФ «Энергопрогресс», 2003.-84 С.
28. Добрусин Л. А. Оптимальные фильтро-компенсирующие устройства для силовых полупроводниковых преобразователей (Ч.1) / Л. А. Добрусин // Современная электроника 2005.- №6.– С. 56-59.
29. Ефимов А. А. Активные преобразователи в регулируемых приводах переменного тока / А. А. Ефимов, Р. Т. Шрейнер.- Новоуральск: Изд. НГТИ, 2001.-250 С.
30. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. – М.: Энергоатоиздат, 1984.-160 С.

31. Жежеленко И. В. Показатели качества и их контроль на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко // М.: Энергоатомиздат, 2000.- 252 С.
32. Железко Ю. С. Применение тарифов на реактивную мощность и энергию, потребляемую и генерируемую потребителями / Ю. С. Железко // Промышленная энергетика. 1991.- №6 .- С. 45-48.
33. Жемеров Г. Г. Энергоэффективность коррекции фазы тока и компенсация пульсаций активной и реактивной мощности в системе электроснабжения / Г. Г. Жемеров, И. Ф. Домнин, О. А. Ильина, Д. В. Тугай // Технічна електродинаміка. - 2007.- №1. - С. 52-57.
34. Жемеров Г. Г. Взаимосвязь между модулем мгновенной реактивной мощности и КПД системы электроснабжения / Г. Г. Жемеров, Н. А. Ильина, О.В. Ильина //Технічна електродинаміка. - К.- 2008. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки.-Ч.4.-С. 31-36.
35. Заболотный А. П. Моделирование электромагнитных процессов в электроприводе, построенном на основе 4Q-S преобразователя / А. П. Заболотный, О. В. Немыкина // Проблемы автоматизированного электропривода Вестн. нац. техн. ун-та «ХПИ».- Харьков: НТУ «ХПИ»,- 2008.- Вып.30.- С. 232-234
36. Загальский Л. Н. Расчет эффективного напряжения высших гармоник в сети, питающей вентиляционные преобразователи / Л. Н. Загальский //Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника.- М.- 1973. - Вып. 3(38).- С. 25—28.
37. Запальский В.Н. Влияние отклонения напряжения и частоты на качество электроснабжения морского подвижного объекта/ В.Н. Запальский, К.Н. Запальский // Вестн. Кременчугского гос. политех. ун-та. - Кременчуг: КрГПУ.-2009. - Вып.3/2009(56).- Ч.2.- С. 187-190.
38. Зиновьев Г. С. Электромагнитная совместимость устройств силовой электроники / Г.С. Зиновьев – Новосибирск: НГТУ, 1998. – 90 С.

39. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники: Учеб. пособие.- Изд.2, испр. / Г.С. Зиновьев.- Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. - 664 С.
40. Инженерная методика расчета синусных фильтров для активных выпрямителей и инверторов напряжения с ШИМ / В.М.Берестов, В. В. Вдовин, С. С. Доманов, В. В. Панкратов, Г. Г. Ситников // Электроприводы переменного тока: Труды международной 15-й конференции. Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 167 – 170.
41. Кабышев А. В. Электроснабжение объектов: Учеб. пособие. Ч.1. -/ А. В. Кабышев.- Томск: Изд-во Томского политехнического университета.- 2007. - 185 С.
42. Кириленко А. В. Энергосберегающий асинхронный электропривод / А. В. Кириленко, И. В. Волков // Проблемы автоматизированного электропривода Вестн. нац. техн. ун-та «ХПИ».- Харьков: НТУ «ХПИ»,- 2008.- Вып.30.- С. 22-27.
43. Колб А. А. К расчету напряжения в звене постоянного тока силовых активных компенсаторов в системах группового питания приводов / А. А. Колб // Вестн. Кременчугского государственного политехнического университета. - Кременчуг: КрГПУ, 2008.- Вып. 4. (51).- С. 37-41.
44. Колб А. А. Система группового питания приводов с емкостными накопителями и параллельными активными фильтрами / А. А. Колб // Электротехнические и компьютерные системы – К. : «Техника».- 2011. Вып. 3(79).- С. 404-407.
45. Колб А. А. Система группового питания электропривода с емкостными накопителями и силовыми активными компенсаторами / А. А. Колб // Сборник научных трудов Днепропетровского государственного технического университета. - Днепропетровск: ДГТУ, 2007. - С. 119 – 122.
46. Колб А. А. Энергосберегающая система группового питания электроприводов с общим преобразователем с двухсторонней проводимостью и емкостным накопителем энергии / А. А. Колб // Вестн.

Кременчугского гос. политех. ун-та. - Кременчуг: КрГПУ, 2003. - Вып.1.- С. 135-143.

47. Колонтаєвський Ю. П. Електроніка та мікросхематехніка: підруч. Для студентів ВНЗ / Ю. П. Колонтаєвський, А. Г. Сосков; за ред. А. Г. Соскова. – К.: Каравела, 2009. - 416С.

48. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. - М.: Наука, 1974.- 832 С.

49. Кошеленко Б. Б. Влияние преобразователей частоты на качество электроэнергии при рекуперации / Б. Б. Кошеленко, О. В. Немыкина, С. Е. Фашенко // Сборник научных трудов SWorld - Выпуск 4. Том 16.- Одесса: МАРКОВА: -2013.- С.62-67

50. Куделько А. Р. Автоматизированный частотно- регулируемый электропривод с асинхронными двигателями / А. Р. Куделько - Владивосток: Изд-во Дальневосточного университета, 1992.-182С.

51. Курнышев Б. С. Электромагнитная совместимость в асинхронных электроприводах переменного тока / Б. С. Курнышев, П. А. Фомин // Вест. ИГЭ. – 2005. – Вып.3 – С. 16-19.

52. Лигерман И. И. Крановые троллеи М. «Энергия», 1969.- 88 С.

53. Литовченко В. В. Определение энергетических показателей электроподвижного состава переменного тока с 4q-S преобразователями // Электротехника.- 1993.- №3.- С. 23-31.

54. Лихошерст В. И. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии с импульсным регулированием / В. И. Лихошерст – Екатеринбург: УГТУ, 2000. -116 С.

55. Макаров В. Л. Стабилизированные выпрямители с емкостным фильтром / В. Л. Макаров, В. А. Петров, С. Г. Попов.- Л.: Энергия, 1975. -136 С.

56. Малафеев С. И. Исследования и разработка мехатронных комплексов с электрическими машинами переменного тока / С. И. Малафеев, А. В. Захаров, А. А. Новгородов, Н. А. Серебrenников // Электроприводы переменного

тока: Труды международной 15-й конференции. Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 247 – 250.

57. Медведев В. Н. Способы обеспечения электромагнитной совместимости мощных преобразователей частоты с электродвигателем и сетью // В. Н. Медведев, А. С. Карандаев, С. А. Евдокимов// Электроприводы переменного тока: Труды международной 15-й конференции. Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 161 – 165.

58. Микитченко А. Я. Выбор емкости силовых конденсаторов в двухзвенных преобразователях частоты с рекуперацией / А. Я. Микитченко, М. В. Могучев, А. Н. Шевченко // Электричество.- 2008.- №6.- С.63-66.

59. Микитченко А. Я. Энергетическая эффективность регулирования в тиристорных и транзисторных электроприводах экскаваторов / А. Я. Микитченко, А. Н. Шевченко, Ю. А. Бирюков, П. Р. Шестаков // Горное оборудование и электромеханика 2008. - №5.- С. 24-31.

60. Микитченко А. Я. Выбор емкости конденсатора в звене постоянного напряжения двухзвенного преобразователя частоты / А. Я. Микитченко, М. В. Могучев, А. Н. Шевченко // Электроприводы переменного тока: Труды международной XIV научно-технической конференции Екатеринбург: УрГТУ, 2007. - С. 39-42.

61. Микитченко А. Я. Транзисторные преобразователи с рекуперацией энергии в сеть / А. Я. Микитченко, М. В. Могучев // Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития Ч.І . Труды IV международной конференции. Магнитогорск: МГГТУ , 2004. – С. 284– 286.

62. Многодвигательные асинхронные электроприводы с автоматическим выравниванием нагрузок / В. В. Панкратов, Д. А. Котин, Е. А. Волкова, В. Ю. Волков, Е. С. Тетюшева, Т. А. Хныкова // Транспорт. Наука, техника, управление. – 2008. – № 6. – С. 27 – 30.

63. Немыкина О. В. Влияние пульсаций напряжения на фильтре на входные энергетические характеристики 4Q-S преобразователя / О. В.

Немыкина, Н. И. Фалалеев // Электротехника и электроэнергетика.- 2004.- №1.- С. 46-53.

64. Немыкина О. В. Исследование влияния параметров нагрузки на энергетические характеристики выпрямительно-инверторной установки для питания частотно-регулируемых приводов / О. В.Немыкина, И. И. Русаков, Н. И. Фалалеев // Вестн. Кременчугского гос. политех. ун-та. - Кременчуг: КрГПУ, 2004.- Вип.3. (26).- С. 90-96.

65. Немыкина О. В. Исследование процессов в сети, питающей группу частотно-регулируемых приводов для крановых установок / О. В. Немыкина // Электротехнические и компьютерные системы – К. : «Техника», - 2011. № 03(79) - С. 355-356.

66. Немыкина О. В. Сравнительный анализ построения сети электропитания кранов с частотно-регулируемым приводом / О. В. Немыкина // Электротехнические и компьютерные системы – К. : «Техника», -2014. Вип. 15 (91), - С.357-359.

67. Немыкина О. В. Энергосберегающий аспект при выборе индуктивности сети, питающей частотно- регулируемый привод / О. В. Немыкина // Вестн. Кременчугского национ. политех. ун-та. - Кременчуг: КрНПУ, 2011. – Вип. 2/2011 (14). – С. 101-104.

68. Об электромагнитной совместимости тиристорных электроприводов экскаватора ЭКГ-10 с питающей сетью / А. Я. Микитченко, А.Н. Шевченко, Д.Р. Шевченко, Э.Г. Греков, С.И. Филимонов // Энергетика: состояние, перспективы, проблемы. Оренбург: 2010. №14- С. 238-243.

69. Остриев В. Н. Экспериментальное исследование трехфазного активного фильтра для применения в современных электронных преобразователях / В. Н. Остриев, Р. В. Мосин // Электричество. - 2003.- №7.- С. 63-66.

70. Осциллограммы (расчетные и фактические) фирмы Danieli и ABB.

71. Опыт разработки и применения тиристорных преобразователей напряжения для управления асинхронными электроприводами / В.А.

Анисимов, А.О. Горнов, М.Ю. Катаев и др.- Электротехника. – 1993 – №6. – С. 37-41.

72. Панкратов В. В. Вентильный электропривод: от стиральной машины до металлорежущего станка и электровоза / В. В. Панкратов // Электронные компоненты. – 2007. – № 2. – С. 68 – 77.

73. Панкратов В. В. Электроприводы подъемно-транспортных механизмов производства ЗАО «ЭРАСИБ» / В. В. Панкратов, О. В. Нос, В. М. Берестов // Проблемы автоматизированного электропривода Вестн. нац. техн. ун-та «ХПИ».- Харьков: НТУ «ХПИ»,2010.- Вип. 28.- С. 307 – 308.

74. Панкратов В. В. Отечественные электроприводы подъемно-транспортных механизмов: разработки ЗАО «ЭРАСИБ» / В.В. Панкратов, В. М. Берестов // "Электротехника, электромеханика и электротехнологии" ЭЭЭ-2009: Материалы IV научно-технической конференции с международным участием / Под ред. В. В. Панкратова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. - С. 139-147.

75. Певзнер Е. М. Эксплуатация крановых тиристорных электроприводов / Е. М. Певзнер, А. Г. Яуре – М.: Энергоатомиздат, 1991.-104с.

76. Певзнер Е. М. Особенности применения преобразователей частоты в крановом электроприводе / Е. М. Певзнер, Е. В. Попов, Л. Б. Масандилов // Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития Ч.I . Труды IV международной конференции. Магнитогорск: МгГТУ, 2004. – С. 177– 181.

77. Пивняк Г. Г. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией / Г. Г. Пивняк., А. В. Волков.- Днепропетровск: НГУ, - 2006. -470 С.

78. Повышение энергосбережения электроприводов переменного тока с преобразователями частоты за счет использования дросселей фирмы ELHAND TRANSFORMATORY / М. Лукевски, А. Осетер, А. Хебровски, В. И. Ткачук, Б. Л. Копчак // Проблемы автоматизированного электропривода Вестн. нац. техн. ун-та «ХПИ».- Харьков: НТУ «ХПИ»,- 2008.-Вып.30. – С. 489-492.

79. Полупроводниковые выпрямители [Текст] / Е. И. Беркович, В. Н. Ковалев, Ф. И. Ковалев ; ред.: Ф. И. Ковалев, П. П. Мосткова. - 2-е изд., перераб. - М. : Энергия, 1978. - 447 с. :
80. Помазановский О. А. Регулируемые электроприводы толстолистного прокатного стана и качество питающей сети / О. А. Помазановский, М. А. Промышлянский, Н. Н. Скидан // Вест. НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ». -2010. Вып. 28. с. 368 – 370.
81. Попов Е. В. Модернизация крановых асинхронных электроприводов с использованием полупроводниковых преобразователей: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : спец 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» / Е.В. Попов М.,-2006.- 20С.
82. Пустовой В. Н. Сравнительное исследование параметров портовых кранов для морских портов Украины / В. Н. Пустовой, А. О. Андриенко // Порты Украины.-2008.- №2.- С.97-107.
83. Пыкин И. Д. Исследование оптимальных по энергетическим критериям алгоритмов векторного управления асинхронными электроприводами / И. Д. Пыкин, В. В. Панкратов // Материалы X международной конф. "Актуальные проблемы электронного приборостроения" АПЭП-2010 – Новосибирск: НГТУ, 2010. – С. 28 – 31.
84. Радимов С. Н. Повышение пропускной способности кранового шинопровода морского порта / С.Н. Радимов, В.Л. Беляев, А.В. Ковченко // Вест. НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ». -2010.- Вып. 28.- С. 349 – 350.
85. Радимов С. Н. Экспериментальное определение фактических электрических параметров крановых шинопроводов – информационная основа оптимизации их функционирования / С.Н. Радимов – Вісн. Одеського державного морського університету. – Одеса, ОДМУ, 2001.- №7.- С.161-168.
86. Радимов С. Н. Потенциал энергосбережения электроприводов портовых грузоподъемных машин / С. Н Радимов, К. А. Аниченко //

Электротехнические и компьютерные системы – К.: «Техника», - 2006. - Вип. 2(56). - С. 61-62.

87. Рогинская Л. Э. Электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей с сетью при питании нагрузки с нелинейной вольтамперной характеристикой / Л. Э. Рогинская, Е. Н. Гуляев // Вест. Чувашского университета. 2010. - №3. - Чебоксары: Изд-во ЧСУ. - С. 244-251.

88. Розанов Ю. К. Современные методы улучшения качества электроэнергии / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчинский // Электротехника - 1998.- №3.- С.10-17.

89. Розанов Ю. К. Современные методы регулирования качества электроэнергии средствами силовой электроники / Ю. К. Розанов // Электротехника -1999.- №4.- С.28-32.

90. Рудницький В. Г. Внутрішньоцехове електропостачання. Навчальний посібник для студ. вищих навч. закладів: курсове проектування / В. Г. Рудницький. Суми : Університетська книга, 2007. - 280 С.

91. Сафощин В. В. НКУ Бурового станка на основе транзисторных преобразователей частоты / В. В. Сафощин, А. Я. Микитченко, М. В. Могучев, А. Н. Шевченко // Автоматизированный электропривод Труды V международной (XVI всероссийской) конференции. Санкт-Петербург: С.-П.ГПУ, 2007. - С.311-313.

92. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением / Г. Г. Соколовский М.: Академия, 2006.- 365С.

93. Справочник по преобразовательной технике. Под ред. И. М. Чиженко. К., «Техника», 1978.- 447 с.

94. Справочник по кранам в 2 т / Брауде В.И., Гохберг М. М., Звягин И.Е. и др. – М.: Машиностроение, 1988. – 536 С.

95. Справочник энергетика промышленных предприятий Т. 1. Электроснабжение. Под общей ред. Федорова А. А., Сербиновского Г. В. и Большама Я. М. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961.- 840 С.

96. Стукачев А.В., Лазарев Н.С. Определение углов коммутации многофазной преобразовательной установки с учетом активного сопротивления цепи. / А. В. Стукачев, Н. С. Лазарев // Вестник электропромышленности.- 1959, №9, с. 16-22.
97. Ткачук А. А. Плавный пуск группы высоковольтных асинхронных электроприводов центробежных механизмов / А. А. Ткачук, В. К. Кривовяз, В. С. Копырин, А. Ю. Силуков // Силовая электроника -2008.- №3.- С.15-19.
98. Федоров А. А. Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования/ А. А.Федоров, А. Е. Старкова– М.: Энергоиздат, 1987.-521С.
99. Фираго Б. И. Электромагнитная совместимость системы "преобразователь частоты – асинхронный двигатель" с системой электроснабжения / Б. И. Фираго, К. М. Медведев, Л. Б. Павлячик // Електромашинобудування та електрообладнання / – Київ, «Техніка», 2006. – Вип. 66. – С. 263-264.
100. Фираго Б. И. Оценка влияния мощности питающей сети и параметров системы "преобразователь частоты – асинхронный двигатель" на гармонический состав её прерывистого входного тока / Б. И. Фираго, К. М. Медведев // Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2006. – №6. – С. 5-11.
101. Харлов Н. Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: Учеб. пос.- Томск: Изд-во ТПУ, 2007.-207с.
102. Храмшин Т. Р. Оценка гармонического состава напряжения сети при работе активных выпрямителей большой мощности / Т. Р. Храмшин, Г. П. Корнилов, Д. С. Крубцов, Р. Р. Храмшин // Электроприводы переменного тока: Труды международной 15-й конференции. Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 157 – 160.
103. Частотно-регулируемый электропривод с резервным питанием от сети постоянного тока / В. М.Берестов, В. В. Вдовин, В.Ю.Волков, С. С. Доманов, В. А.Клан, Д. А. Котин, В. В. Панкратов // Электроприводы переменного тока:

Труды международной 15-й конференции. Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 43 – 46.

104. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных.- М.:ДМК Пресс; СПб.: Питер,2008. -288С.

105. Чехет Э. М. Современные тенденции построения 4-х квадрантных преобразователей частоты для электропривода / Э. М. Чехет, В. Н. Соболев, С. И. Полищук // Third international scientific and technical conference on unconventional electromechanical and electrical systems. Alyshta, Ukraine, September 19-21, 1997, vol. 1, p.47-50.

106. Шидловский А. К. Транзисторные преобразователи с улучшенной электромагнитной совместимостью / А. К. Шидловский, А. В. Козлов, Н.С. Комаров, Г. А. Москаленко. – К.: Наукова думка,1993.-271С.

107. Шоленко А. Н. Применение фильтро-компенсирующих устройств (ФКУ) совместно с системой тиристорный преобразователь-двигатель (ТП-Д) в экскаваторном электроприводе / А. Н. Шоленко, Д. Р. Шевченко // Современные проблемы электроснабжения. Труды международной XVII конференции. Белгород: БНТУ, 2007. – С.129-131.

108. Шрейнер Р. Т. Прогнозирующее релейно-векторное управление активным выпрямителем напряжения / Р. Т. Шрейнер, А. А.Ефимов, Г. С. Зиновьев // Электротехника.- 2001.-№12.-С.47-52.

109. Шрейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р.Т. Шрейнер. - Екатеринбург РАН. Уральское отделение, 2000.- 653С.

110. Шурыгина В. Суперкондесаторы. Размеры меньше, мощность выше. Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2009.- №7.

111. Электротехнический справочник Т 3. Кн. 1. Производство и распределение электрической энергии (под общ. ред. профессоров МЭИ: И. Н. Орлова и др.). – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 616С.

112. Яуре А.Г. Новые технические решения электроприводов мостовых кранов / А.Г. Яуре М.: ЦНТИТЭИтяжмаш, 1991.-32с.
113. Яуре А.Г., Певзнер Е. М. Крановый электропривод: Справочник / А.Г. Яуре, Е.М. Певзнер // М.: Энергоатомиздат, 1988.-344 С.
114. A three-phase voltage- type PWM rectifier with the function of an active power filter / T. Kataoka, Y. Fuse, D. Nakajima, S. Nishikata // Power Electronics and Variable Speed Drives. – 2000. – September. – P.386 – 391.
115. Blaabjerg F. Passive filters – Potentialities and Limitations // IEEE Trans. On Industry Applications. – Vol. 40, Is. 1. – P.232 - 241.
116. Ciura S. Economic aspects of electricity supply quality/ S.Ciura, W.Gos, B Szewc// Ефективність і якість електропостачання промислових підприємств – Збірник праць IV Міжнародної наукової конференції Маріуполь.:МГТУ, 2000. С.325-330.
117. Czarnecki L.S. Powers in nonsinusoidal networks: theirs interpretation. Analysis and measurement. IEEE. Trans. Instr. Meas. Vol. Im-39. N 2. April 1990.
118. Blaabjerg F. Passive filters – Potentialities and Limitations // IEEE Trans. On Industry Applications. – Vol. 40, Is. 1. – P.232 - 241.
119. Dixon J.W. Indirect current control of a unity power factor sinusoidal current boost type thee-phase rectifier / J. W. Dixon, B. -T. Ooi // IEEE Trans. Power Electron. – 1988. – November . – Vol. 35. – N. 4. – P. 508 – 515.
120. Electromagnetic Compatibility (EMC) of Technical Equipment, IEC 61800-3:2012 International Standard, 2012.
121. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems // IEEE standard 519-1992, London 1992.
122. Jain S. Modeling of frequency domain control of shunt active power folter using matlab simulink and power system blockset // IEEE Trans. Power Electron. – 2004. – P. 1124 – 1129.
123. Kim H. The instantaneous power theory based on mapping matrices in three-phase four-wire systems / H. Kim, H. Akagi // In Proc. PCC ’97 Conf. – 1997. – Aug. – Nagaoka, Japan. – Vol. 1. – P. 361-366.

124. Limitation of Emission of Harmonic Currents in low Voltage Power Supply Systems for Equipment with rated Current Greater than 16 A Per Phase, IEC 61000-3-12:2004 International Standard, 2004.
125. Liserre M. Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier / M. Liserre, F. Blaabjerg, S. Hansen // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2005. September / October. – Vol. 41. – No. 5. – P. 1281 - 1291.
126. Nestli T.F. Powering Troll with new technology / T.F. Nestli, L. Stendius, M.J. Johansson, A. Abrahamsson, P.C. Kjaer.// ABB Review.- 2003.-№2.- P. 15-19.
127. Pettersson S. Applying an LCL-filter to a four-wire active power filter / S. Pettersson, M. Salo, H. Tuusa / 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference. – 2006. – June 18 – 22. – P. 1413 - 1419.
128. Resonance in Large Industrial Networks by High-Powered Thyristor Converters Inverters / I.V.Zhezhelenko. Y.L.Sayenko. T.Szarka. L.Sentirmai and other // Proc. 6th Conf. On Power Electronics and Motion Control. Budapest, 1990.- P. 113 - 119.
129. Singh B. Review of Active Filter for Power Quality Improvement / B. Singh., Al-Haddad K., Chandra A. A // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1999. – Oct. – Vol. 46. – P. 960 – 971.
130. Soares V. Linear and sliding-mode controllers for three-phase four-wire power converters / V. Soares, P. Verdelho // IEEE Trans. Power Electron. – 2005. – June. – P. 799 – 804.
131. Xiao J. Algorithm for the Parameters of Double Tuned Filter. 8th international conference of harmonics and quality of power proceeding / J. Xiao // Athens, 1998.- P.154-157.
132. Zhezhelenko I., Sayenko Y. Centralized Compensation of High Harmonics in Electrical Networks Electrical Power Quality and Utilization / I. Zhezhelenko, Y. Sayenko // Cracow, 1999. -№2. - P.29-35.
133. Пат. UA 44892 Україна, МПК⁶ H02P7/00, H02P21/00. Спосіб векторного керування струму на стороні змінного струму трифазного

чотириквандрантного перетворювача / Волков О.В., Волков В.О., Антонов М.Л. ; власник Запорізький національний технічний університет. - № U200900025; заяв.05.01.2009; опубл. 26.10.2009, Бюл. № 20.

134. Пат. 91486 Российская Федерация, МПК Н 02 М7/08. Многофазный преобразователь / Л.Э. Рогинская, Е.Н. Гуляев, Ю.В. Рахманова; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет». № 2009136848/22; заявл. 05.10.09; опубл. 10.02.10, Бюл. № 4. 9 с.

135. Patent Application Publication US2006197385 (A1) /Harmonic Mitigating Device with magnetic shunt/M. Levin., I. Volkov, - 07.09.2006.

Приложение А

Параметры системы электропитания кранов переменного тока

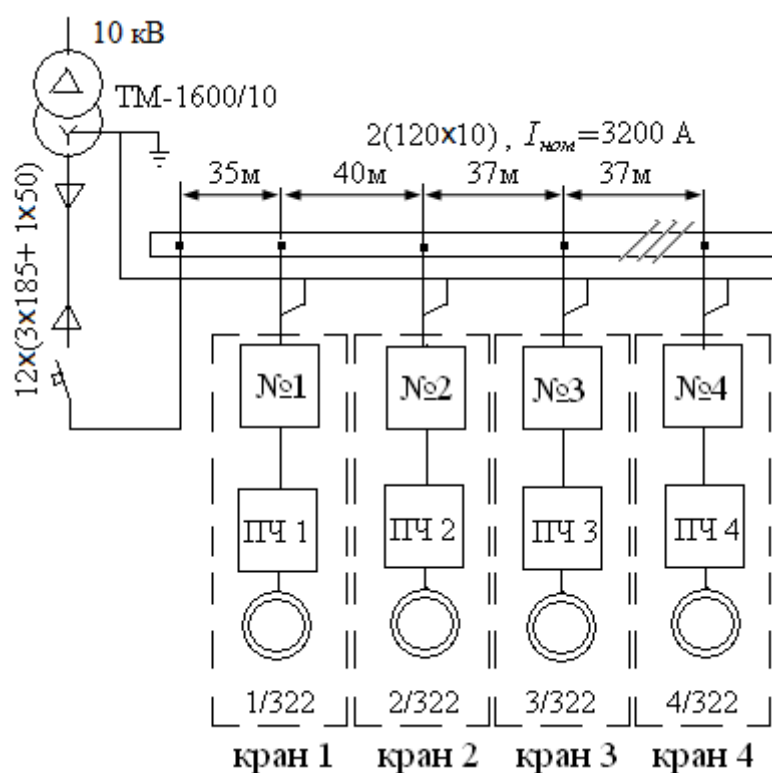


Рисунок А - Схема электропитания группы порталных кранов с шиной переменного тока

Питание кранов осуществляется от береговой ПС с трансформатором ТМ-1600/10. Соединение длиной 150 м между трансформатором и началом шин с $I_{ном} = 3200$ А выполнено через 12 кабельных линий (3х185+1х150) мм². По длине шинопровода расположены колонки (№1-№4) через 35-40 м.

Установленная мощность крана «Сокол» $P_{уст.} = 342$ кВт (грузоподъемностью 16 т, при вылете стрелы 32 м). Двигатели крана «Сокол» имеют такие параметры (подъем: 2×110 кВт, ПВ = 60%; поворот: 2×26 кВт, ПВ = 40 %; вылет стрелы: 2×20 кВт, ПВ = 40 %; передвижение: 4×7,5 кВт, ПВ = 25 %). Параметры двигателей кранов представлены в таблице А.1. К системе питания с шиной переменного тока подключено четыре крана. Источник задан системой ограниченной мощности с током КЗ на шинах 10 кВ $I'' = 13,7$ кА [41].

Таблица А.1 - Параметры двигателей кранов «Сокол»

Двигатель пара- метры	подъем	поворот	вылет стрелы	передвижение
Кран 1÷4	$P_{уст.} = 220$ кВт	$P_{уст.} = 52$ кВт	$P_{уст.} = 40$ кВт	$P_{уст.} = 30$ кВт
$P_{уст.} = 342$ кВт	ПВ = 60 %	ПВ = 40 %	ПВ = 40 %	ПВ = 25 %
$P_{уст.Σ}$, кВт	880	208	160	120
$P_{ном.Σ}$, кВт	681,6	131,55	101,2	60

Паспортные данные трансформатора ТМ-1600/10 ($S_{ном} = 1600$ кВА):

$$P_{xx} = 2,65 \text{ кВт}, P_{кз} = 16,5 \text{ кВт}, U_{кз} = 5,5\%, I_{xx} = 1\%.$$

Кабельная линия выполнена кабелем, сечением $(3 \times 185 + 1 \times 150)$ мм². Длина КЛ $l = 150$ м, количество кабелей $n = 12$. Удельные параметры кабеля $X_0 = 0,06$ мОм/м, $R_0 = 0,017$ мОм/м.

Параметры шины открытого исполнения, сечением (120×10) мм², $I_{ном} = 1600$ А, $R_0 = 0,033$ мОм/м, $X_0 = 0,082$ мОм/м, при среднегеометрическом расстоянии между фазами 150 мм [95]. Расстояние между колонками подключения n - крана $l_n = 35-40$ м. При токе $I_{ном} = 3200$ А количество шин в фазе две [52].

Расчетная мощность узла нагрузки определялась по расчетному методу. Значение расчетного коэффициента $k_{расч.} = 1,47$ для $n_{эф} = 4$ и $k_{исп} = 0,3$ [90]:

$$P_{расч.} = 407,4 \text{ кВт}$$

Значения активного и индуктивного сопротивления элементов, относительные значения индуктивного сопротивления элементов, представлены в таблице А.2.

Таблица А.2 – Значения активного и индуктивного сопротивления элементов
СЭК переменного тока

элемент			R, Ом	X, Ом	L,Гн	$U_{к3}(S_T)$, %	$U_{к3}(S_{Пч\Sigma})$,%
система			-	$0,68 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	0,68	0,46
Т			$1,03 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$17,2 \cdot 10^{-6}$	5,5	3,72
КЛ			$2,13 \cdot 10^{-3}$	$0,75 \cdot 10^{-3}$	$2,39 \cdot 10^{-6}$	0,75	0,51
шина переменного тока	№	l,м					
	1	35	$0,58 \cdot 10^{-3}$	$2,87 \cdot 10^{-3}$	$9,14 \cdot 10^{-6}$	2,87	1,94
	2	40	$0,66 \cdot 10^{-3}$	$3,28 \cdot 10^{-3}$	$10,46 \cdot 10^{-6}$	3,28	2,22
	3	37	$0,61 \cdot 10^{-3}$	$3,034 \cdot 10^{-3}$	$9,66 \cdot 10^{-6}$	3,034	2,05
	4	37	$0,61 \cdot 10^{-3}$	$3,034 \cdot 10^{-3}$	$9,66 \cdot 10^{-6}$	3,034	2,05
	III_{Σ}		$2,46 \cdot 10^{-3}$	$12,22 \cdot 10^{-3}$	$38,92 \cdot 10^{-6}$	12,22	8,26
Σ (до крана №1)		$5,62 \cdot 10^{-3}$ ($3,74 \cdot 10^{-3}$)	$19,15 \cdot 10^{-3}$ ($9,8 \cdot 10^{-3}$)	$60,72 \cdot 10^{-6}$ ($30,93 \cdot 10^{-6}$)	19,15 (9,8)	12,95	

Доля активного сопротивления шины в сопротивлении СЭК составляет:

$$2,46 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \% / 5,62 \cdot 10^{-3} = 43,7 \%$$

Доля индуктивного сопротивления шины в сопротивлении СЭК составляет: $12,22 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \% / 19,15 \cdot 10^{-3} = 63,81 \%$.

Приложение Б

Параметры системы электропитания кранов постоянного тока

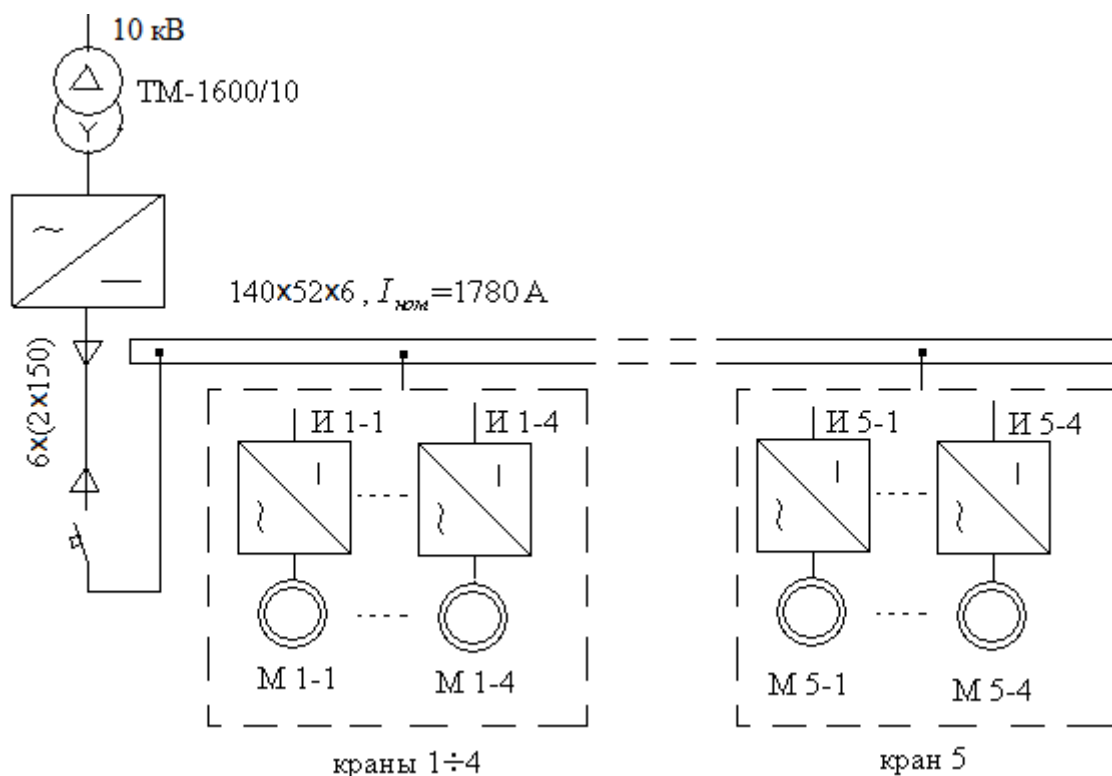


Рисунок Б - Схема электропитания группы мостовых кранов с троллейной линией постоянного тока

Питание кранов осуществляется от цеховой ПС с трансформатором ТМ-1600/10. Соединение длиной 30 м между трансформатором и началом троллейных линий с $I_{ном} = 1780$ А выполнено через 6 кабельных линий (2x150) мм². По длине троллейных линий расположены ящики силовые (№1-№5) через 50-70 м.

Установленная мощность крана, грузоподъемностью 80 т: $P_{уст.} = 288$ кВт. Установленная мощность крана, грузоподъемностью 50 т : $P_{уст.} = 123$ кВт. Параметры двигателей кранов представлены в таблице Б.1. К системе питания постоянного тока подключено четыре крана $P_{уст.} = 288$ кВт и один кран $P_{уст.} = 123$ кВт.

Источник задан системой ограниченной мощности с током КЗ на шинах 10 кВ $I'' = 12,1$ кА [41].

Таблица Б.1 - Параметры двигателей кранов постоянного тока

Двигатель пара- метры	подъем	вспомогатель- ный подъем	передвиже- ние моста	передвижение тележки
Кран 1÷4	$P_{уст.} = 185 \text{ кВт}$	$P_{уст.} = 55 \text{ кВт}$	$P_{уст.} = 32 \text{ кВт}$	$P_{уст.} = 16 \text{ кВт}$
$P_{уст.} = 288 \text{ кВт}$ $P_{ном.} = 175,8 \text{ кВт}$	ПВ = 40 %	ПВ = 40 %	ПВ = 25 %	ПВ = 25 %
$P_{уст. \Sigma}, \text{ кВт}$	740	220	128	64
Кран 5	$P_{уст.} = 75 \text{ кВт};$	$P_{уст.} = 23 \text{ кВт};$	$P_{уст.} = 18 \text{ кВт}$	$P_{уст.} = 6,5 \text{ кВт}$
$P_{уст.} = 123 \text{ кВт}$ $P_{ном.} = 74,2 \text{ кВт}$	ПВ = 40 %	ПВ = 40 %	ПВ = 25 %	ПВ = 25 %
$P_{уст. \Sigma}, \text{ кВт}$	75	23	18	6,5
Краны 1÷5	815	243	146	70,5
$P_{уст. \Sigma}, \text{ кВт}$	515,45	153,69	73	35,25
$P_{ном. уз. нагр.}, \text{ кВт}$	776,4			

Паспортные данные трансформатора ТМ-1600/10 ($S_{ном} = 1600 \text{ кВА}$):

$P_{ХХ} = 2,65 \text{ кВт}$, $P_{КЗ} = 16,5 \text{ кВт}$, $U_{КЗ} = 5.5 \%$, $I_{ХХ} = 1 \%$.

Кабельная линия выполнена кабелем, сечением $(2 \times 150) \text{ мм}^2$, $R_0 = 0,19 \text{ мОм/м}$, $L_0 = 0,25 \cdot 10^{-6} \text{ Гн /м}$. Длина - 30 м, количество кабелей $n = 6$.

Троллейная линия, выполнена швеллером №14, размером $140 \times 52 \times 6 \text{ мм}$. Параметры троллейной линии $I_{ном} = 1780 \text{ А}$, $R_0 = 3,9 \text{ мОм/м}$, $L_0 = 7,2 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$, длина до п- крана $l_n = 50\text{-}70 \text{ м}$.

Расчетная мощность узла нагрузки (уз. нагр.) для 5-ти кранов, определялась по расчетному методу. Значение расчетного коэффициента $k_{расч.} = 1,05$ $n_{эф} = 10$ и $k_{исп} = 0,5$ [90]:

$$P_{расч.} = 408,13 \text{ кВт}$$

Значения эффективного числа ЭП приведены в таблице Б.2

Таблица Б.2 – Значения эффективного числа ЭП

Количество кранов	Грузоподъемность крана, т	$P_{ном.}$, кВт	n - ЭП	$n_{эф}$ ЭП
2	80	175,8	8	4,3
2	50	74,2	8	4,06
2	80; 50	175,8; 74,2	8	3,52
3	80	175,8	12	6,5
3	50	74,2	12	6,09
3	80; 50	175,8; 74,2	12	5,5
4	80	175,8	16	8,6
4	50	74,2	16	8,12
4	80; 50	175,8; 74,2	16	7,5
5	80	175,8	20	11,3
5	50	74,2	20	10,15
5	80; 50	175,8; 74,2	20	9,5

Значения сопротивлений, индуктивности элементов, относительные значения индуктивного сопротивления элементов, приведены в таблице Б.3.

Таблица Б.3 – Значения активного и индуктивного сопротивления элементов
СЭК постоянного тока

элемент			R , Ом	X , Ом	L , Гн	$U_{кз}(S_T)$, %	$U_{кз}(S_{Пч\Sigma})$, %
система			-	$0,76 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	0,76	0,64
Т			$1,03 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$17,2 \cdot 10^{-6}$	5,5	4,64
КЛ			$1,05 \cdot 10^{-3}$	-	$1,25 \cdot 10^{-6}$	-	-
троллей постоянного тока	№	(l)					
	1	50	0,195	-	$0,36 \cdot 10^{-3}$	-	-
	2	50	0,195	-	$0,36 \cdot 10^{-3}$	-	-
	3	55	0,215	-	$0,4 \cdot 10^{-3}$	-	-
	4	60	0,23	-	$0,43 \cdot 10^{-3}$	-	-
	5	70	0,27	-	$0,51 \cdot 10^{-3}$	-	-
	T_Σ		1,1	-	$2,06 \cdot 10^{-3}$	-	-
Σ			1,101	-	$2,07 \cdot 10^{-3}$	6,26	5,3

Доля активного сопротивления троллейной линии в сопротивлении
СЭК составляет:

$$1,1 \cdot 100 \% / 1,101 \cdot 10^{-3} = 99,9 \, \%.$$

Приложение В

Численные значения параметров сечений шин и троллейных линий на постоянном и переменном токах

Таблица В.1 - Численные значения параметров сечений шин

$S, \text{мм}^2$	$j^*, \text{о.е.}$	$I_{\text{дл. доп.}}, A$	$I_{\text{дл. доп.}}, A$	$tg\varphi$	Размер, мм
45	1	165	165	0,4	15×3
60	1	215	215	0,5	20×3
75	1	265	265	0,59	25×3
120	1,01	370	365	0,79	30×4
160	1,01	480	475	0,96	40×4
200	1,01	545	540	1,2	40×5
250	1,01	670	665	1,4	50×5
300	1,01	745	740	1,7	50×6
360	1,012	880	870	1,9	60×6
480	1,014	1040	1025	2,56	60×8
600	1,02	1180	1155	2,76	60×10
480	1,02	1170	1150	2,99	80×6
640	1,03	1355	1320	3,09	80×8
800	1,04	1540	1480	3,86	80×10
600	1,02	1455	1425	4	100×6
800	1,04	1690	1625	4,2	100×8
1000	1,05	1910	1820	4,4	100×10
960	1,07	2040	1900	4,5	120×8
1200	1,1	2300	2070	4,6	120×10

Значения $tg\varphi$ –при среднегеометрическом расстоянии между фазами 300 мм.

Численные значения параметров алюминиевых шин приняты по [52,95]

Таблица В.2 - Численные значения параметров стальных уголков

$S, \text{мм}^2$	$j^*, \text{о.е.}$	$I_{\text{дл. доп.}}, A$	$I_{\text{дл. доп.}}, A$	$tg\varphi$	Размер, мм
143	1,46	220	150	0,58	25×25×3
227	1,64	305	185	0,58	30×30×4
267	1,69	355	210	0,58	35×35×4
308	1,7	410	250	0,58	40×40×4
379	1,72	455	265	0,58	40×40×5
480	1,79	565	315	0,58	50×50×5
569	1,85	610	330	0,58	50×50×6
691	1,87	740	395	0,58	60×60×6
903	2,05	840	410	0,58	60×60×8
1150	2,09	1085	520	0,58	75×75×8
1410	2,2	1180	540	0,58	75×75×10

Численные значения параметров стальных уголков приняты по [52,95]

Таблица В.3 – Сравнительная оценка СЭК с ЧРП для указанных примеров

Критерий	переменный	постоянный	переменный	постоянный
1. $P_{\text{расч}}$ СЭК, при $P_{\text{ном}\sim} = P_{\text{ном-}}$	$P_{\text{расч}\sim} = 1;$ $n_{\text{эф}\sim} = 5;$ $k_{\text{исп}} = 0,5;$	$P_{\text{расч-}} = 0,88;$ $n_{\text{эф-}} = 10;$ $n_{\text{эф}}^* = 2;$ $k_{\text{исп}} = 0,5;$	$P_{\text{расч}\sim} = 1;$ $n_{\text{эф}\sim} = 4;$ $k_{\text{исп}} = 0,3;$	$P_{\text{расч-}} = 0,87;$ $n_{\text{эф-}}^* = 7;$ $n_{\text{эф}}^* = 1,75;$ $k_{\text{исп}} = 0,3;$
Экономия на $P_{\text{расч}}$ трансформатора	$P_{\text{расч}} = \frac{1-0,88}{1} \cdot 100\% = 12\%,$		$P_{\text{расч}} = \frac{1-0,87}{1} \cdot 100\% = 13\%$	
Токоведущий материал	Троллейная линия (сталь)		Шина (алюминий)	
	$\cos\varphi=0,95$	-	$\cos\varphi = 0,95$	-
2. $I_{\text{расч}}$, при $P_{\text{ном}\sim} = P_{\text{ном-}}$	$1/0,95=1,05$	1,07	$1/0,95=1,05$	1,06
j^* , о.е.	1	2,2	1	1,1
Сечение шины по нагреву (S_j^*), о.е.	1,05	0,49	1,05	0,96
$3 \Delta U_{\text{доп}}$	$\Delta U_{\text{доп}} \leq 5\%$	$\Delta U_{\text{доп}} \leq 4\%$	$\Delta U_{\text{доп}} \leq 5\%$	$\Delta U_{\text{доп}} \leq 4\%$
$\text{tg}\varphi/j^*$	0,58/1	-/2,2	4,6/1	-/1,1
ΔU_y , /300 м	4,89%	3,99%	4,9%	4%
Сечение ($S_{\Delta U}^*$), о.е. $S_{\Delta U}^* = S_j^* \cdot k$	$1,05 \cdot 4,95 = 5,2$	$0,49 \cdot 3,36 = 1,65$	$1,05 \cdot 3,82 = 4,011$	$0,96 \cdot 1,6 = 1,54$
Сечение п-троллей, шин, (S^*), о.е	$5,2 \cdot 3 = 15,6$	$1,65 \cdot 2 = 3,3$	$4,011 \cdot 4 = 16,04$	$1,54 \cdot 2 = 3,08$
Экономия на сечении п-троллей, шин, $\cos\varphi = 0,95$	$S = \frac{(15,6) - (3,3)}{(15,6)} \cdot 100\% = 79\%$		$S = \frac{(16,04) - (3,08)}{(16,04)} \cdot 100\% = 81\%$	

где k – коэффициент увеличения шин, троллейных линий с учетом проверки по потери напряжения.

Приложение Г

Зависимости потери напряжения в шинах и троллейных линиях

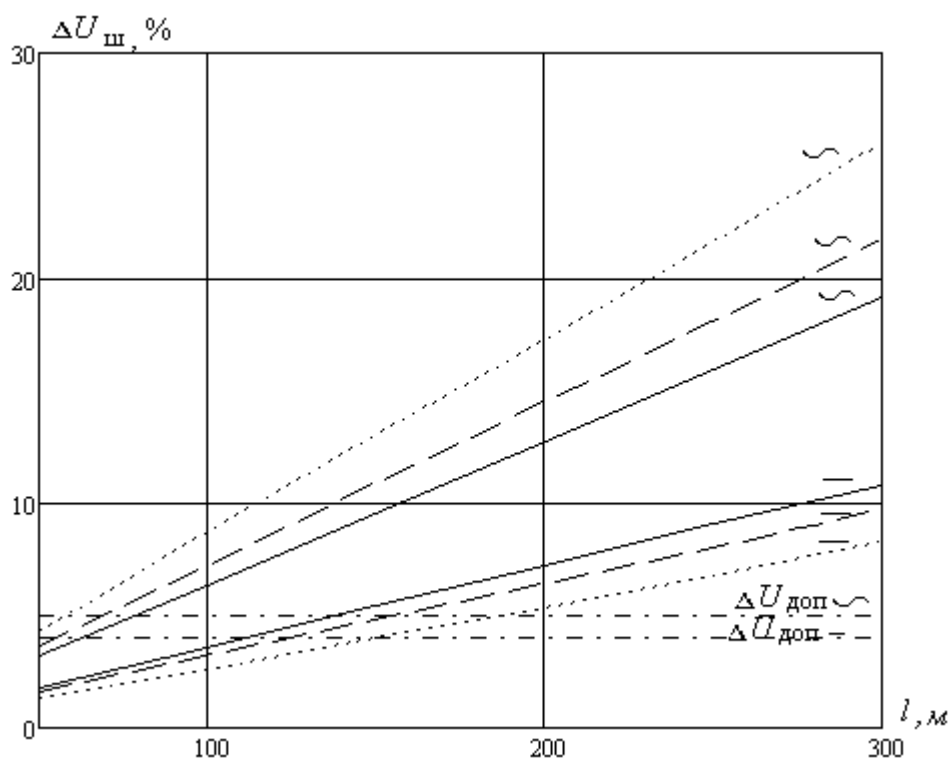


Рисунок Г.1 - Зависимость потери напряжения на шинах ≤ 1000 А
переменного ($\cos \varphi = 0,5$) и постоянного тока

(—) - для сечения 40×5 мм²; (---) - для сечения 50×6 мм²; (· · ·) - для сечения 60×8 мм²;

(- · -) - допустимая потеря напряжения на шине переменного и постоянного тока

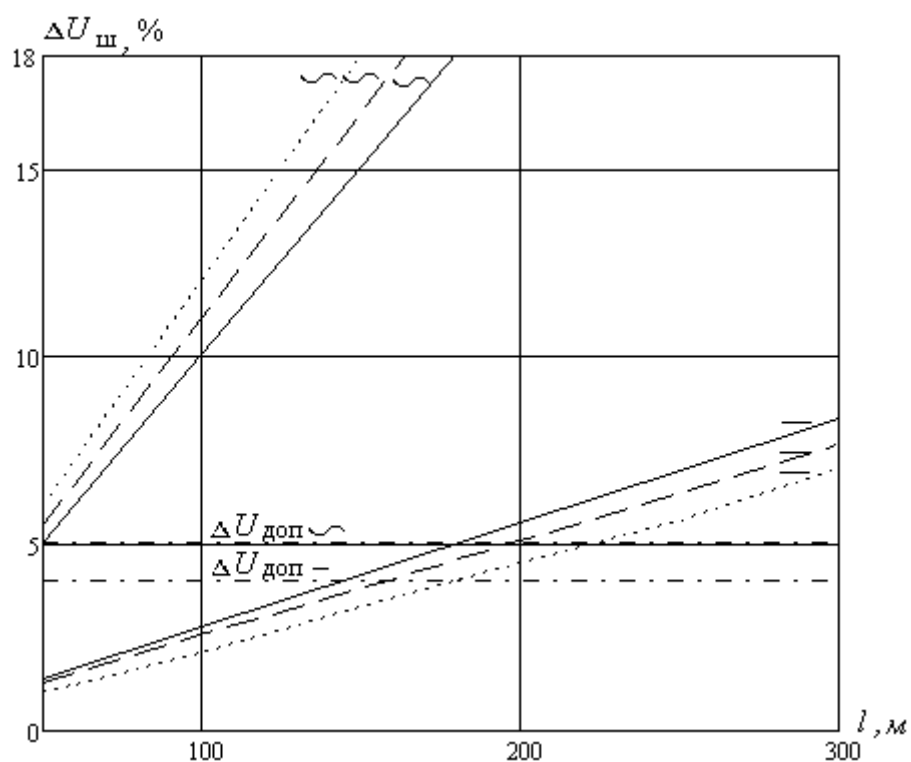


Рисунок Г.2 - Зависимость потери напряжения на шинах $>1000 \text{ А}$

переменного ($\cos \varphi = 0,5$) и постоянного тока

(—) - для сечения $80 \times 8 \text{ мм}^2$; (---) - для сечения $80 \times 10 \text{ мм}^2$; ($\cdots$) - для сечения $100 \times 10 \text{ мм}^2$;

(— · —) - допустимая потеря напряжения на шине переменного и постоянного тока

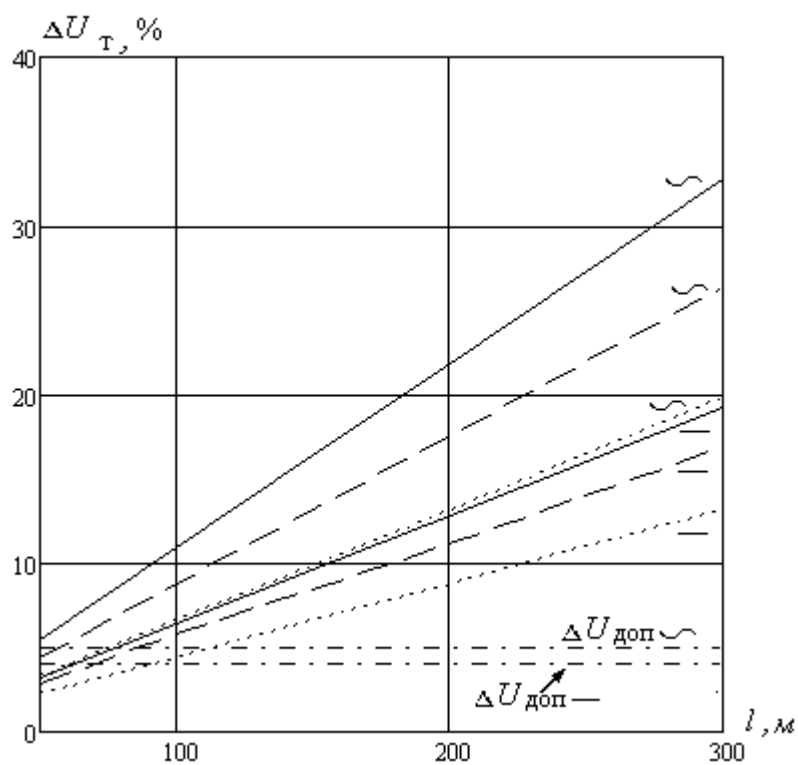


Рисунок Г.3 - Зависимость потери напряжения на троллейной линии переменного ($\cos \varphi = 0,5$) и постоянного тока

(—) - для размера $30 \times 30 \times 4$ мм; (---) - для размера $50 \times 50 \times 5$ мм; ($\cdots$) - для размера $60 \times 60 \times 8$ мм;
 (— · —) - допустимая потеря напряжения на уголке переменного и постоянного тока

Приложение Д

Зависимости сечения шин и троллейных линий в функции граничной
длины по условию потери напряжения

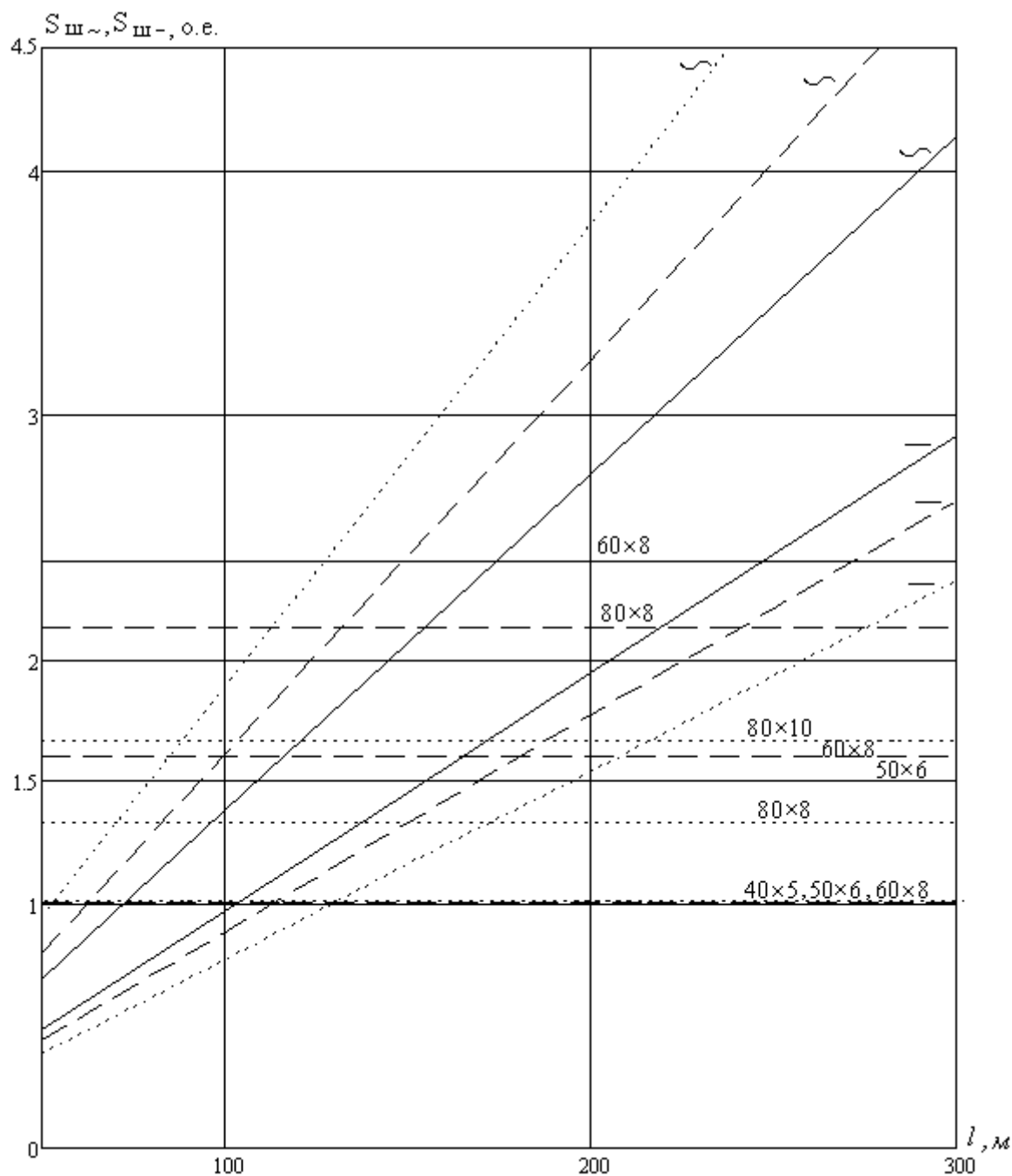


Рисунок Д.1 - Зависимость сечения шин ≤ 1000 А переменного
($\cos \varphi = 0,5$) и постоянного тока

(—) - для сечения 40×5 мм²; (---) - для сечения 50×6 мм²; (···) - для сечения 60×8 мм²;

(—), (---), (···) - сечение шин по допустимому нагреву

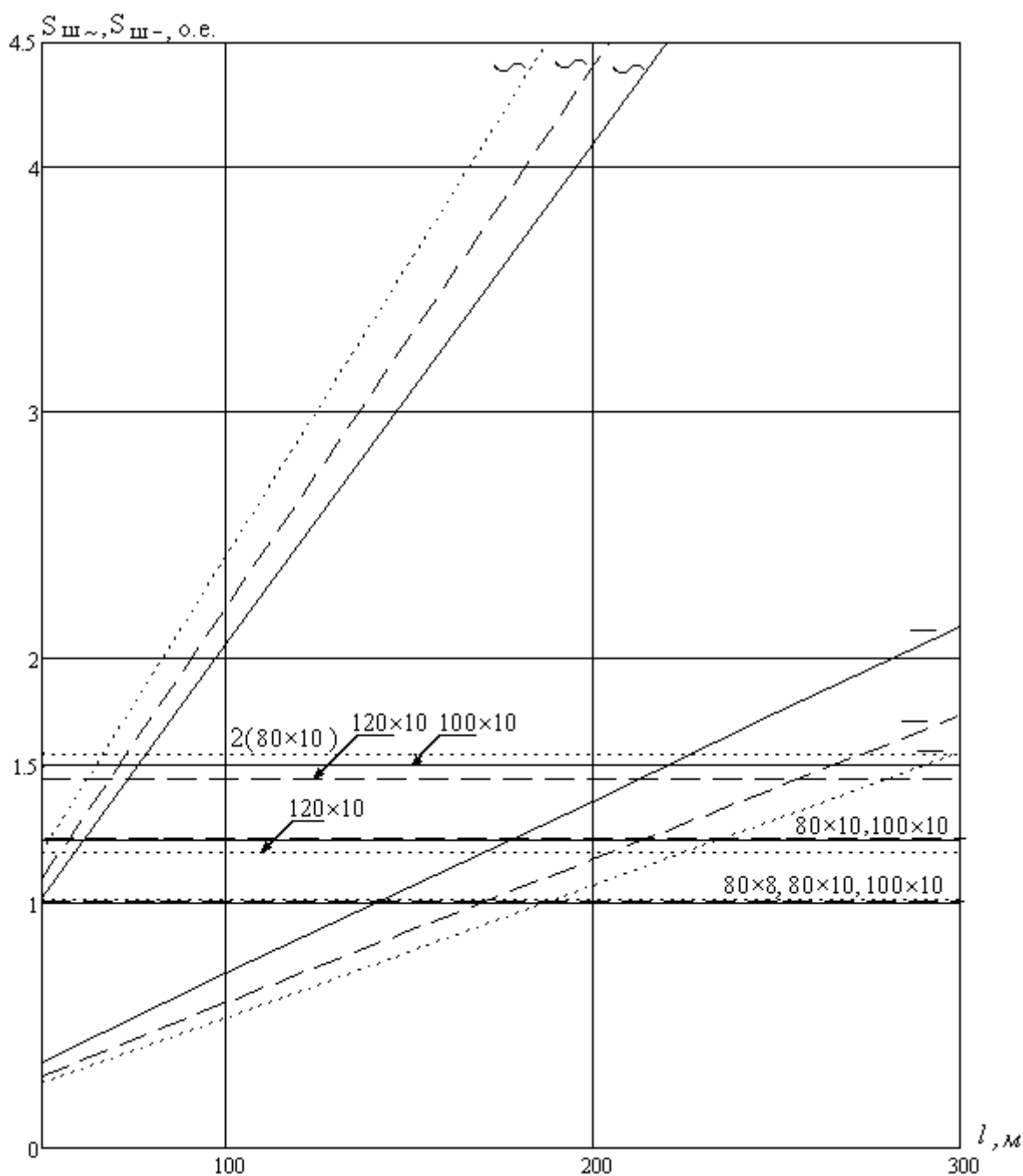


Рисунок Д.2 - Зависимость сечения шин $>1000 \text{ А}$ переменного
($\cos \varphi = 0,5$) и постоянного тока

(—) - для сечения $80 \times 8 \text{ мм}^2$; (---) - для сечения $80 \times 10 \text{ мм}^2$; (···) - для сечения $100 \times 10 \text{ мм}^2$;
(-), (- -), (···) - сечение шин по допустимому нагреву

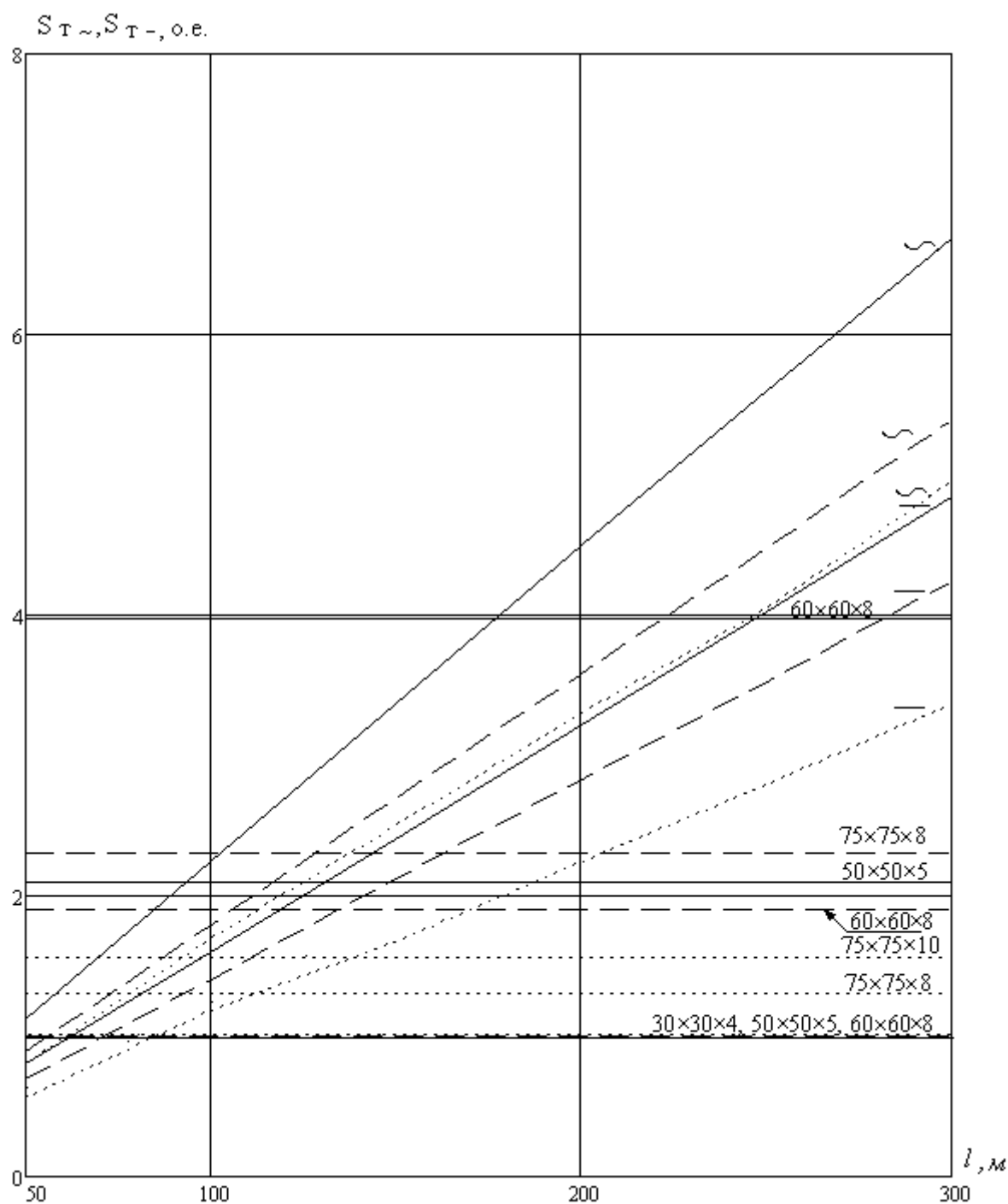


Рисунок Д.3 - Зависимость сечения уголка переменного
($\cos \varphi = 0,5$) и постоянного тока

(—) - для размера 30×30×4 мм; (---) - для размера 50×50×5 мм; (···) - для размера 60×60×8 мм;
(—), (---), (···) - сечение уголка по допустимому нагреву

Приложение Е – Акт испытания



А К Т

Порт Южный

18 мая 2000 г.

Настоящий акт составлен в том, что 17-18 мая с.г. на стенде РММ МПП Южный проведены испытания совместно работающих преобразователя частоты (ПЧ) ATV-58, произведенного французской фирмой Шнайдер Электрик, и инверторно-выпрямительного устройства (ИВУ), изготовленного в НИИ Преобразователь (г. Запорожье).

В испытаниях участвовали:

- от МПП Южный - ведущий инженер ОМ по новой технике Омельченко Ю.М.;
- от НИИ Преобразователь - инженер-конструктор Алексеев В.А.;
- От ОГМУ - профессор кафедры Э и ЭОС Радимов С.Н.

Цель испытаний - проверка аппаратной и программной совместимости ПЧ ATV-58 и устройства ИВУ при имитации работы штатных режимов крановых приводов поворота и изменения вылета стрелы: разгона, движения с установившейся скоростью, торможения.

На время испытаний ПЧ ATV-58 получал питание по силовому входу постоянного тока от ИВУ. Связь с силовой сетью 0,4 кВ осуществлялась только через ИВУ; к выходу ПЧ ATV-58 подключались параллельно три двигателя один - 26 кВт и два по 20 кВт, обмотки роторов двигателей замыкались накоротко.

В процессе испытаний установлено нормальное функционирование совместно работающих ПЧ и ИВУ, обеспечивающих плавный разгон, торможение и возможность регулирования скорости механизмов. При торможении двигателей зафиксирована рекуперация энергии в сеть.

Заключение

Результаты испытаний подтвердили возможность создания электропривода крановых механизмов на основе ПЧ ATV-58 и ИВУ, позволяющего обеспечить штатные режимы работы при экономном потреблении электроэнергии. Их успешное проведение позволяет приступить к выполнению следующего этапа работ, предусмотренного Протоколом совещания от 02.03.00 г.

От МПП Южный: ведущий инженер по новой технике ОМ *Ю.М.Омельченко*

От НИИ Преобразователь инженер-конструктор *В.А.Алексеев*

От ОГМУ профессор кафедры ЭиЭОС *С.Н.Радимов*

Приложение Ж – Акты внедрения



Утверждаю
Генеральный директор
ООО «НИИ «Преобразователь»
Андрянов Ю.А.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Немыкиной Ольги Владимировны
«Повышение эффективности систем электропитания кранов с
частотнорегулируемым приводом»

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационной работы Немыкиной О.В. приняты к использованию в ООО «НИИ «Преобразователь» при разработке и внедрении регулируемых электроприводов крановых установок с рекуперацией энергии в сеть.

Особенно важными и практически ценными являются результаты:

1. Исследование электромагнитных процессов в преобразователях (активных выпрямителях) с двухсторонней проводимостью, которые позволили сформулировать технические требования к алгоритмам систем управления преобразователя и параметрам входных реакторов.

2. Методика оценки вариантов систем электропитания крановых установок.

3. Рекомендации по улучшению электромагнитной совместимости.

Вышеперечисленные рекомендации и результаты исследований используются при модернизации рекуперированного выпрямителя ВР-ТППТ-300-0,4 для группового питания автономных инверторов напряжения и инвертора для рекуперации энергии в сеть в электроприводе согласованного вращения механизма передвижения крана типа МПЧ-ТПП-160-380-50 УХЛ4.

Технический директор
ООО «НИИ «Преобразователь»

Ведущий инженер

А.Г.Кришталь

И.Ю.Немудрый

«Утверждаю»
Проректор по научной работе ЗНТУ
проф. Внуков Ю.М.



«Утверждаю»
Директор ГП «ГИПРОПРОМ»
Меньков М.П.



2015г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы Немыкиной Ольги Владимировны «Повышение эффективности систем питания кранов с частотно-регулируемым приводом».

Настоящий акт составлен о том, что в электротехническом отделе ГП «ГИПРОПРОМ» с 2.03.2015 используются рекомендации для разработки, проектирования и модернизации систем питания кранов, направленные на снижение капитальных затрат и потерь мощности в системах питания.

Рекомендации разработаны на основе диссертационной работы Немыкиной Ольги Владимировны выполненной на кафедре «Электроснабжения промышленных предприятий» Запорожского Национального технического университета, в рамках государственной научно-исследовательской программы №01719 «Разработка методов оптимизации систем электроснабжения с полупроводниковыми преобразователями и электротехнологическими установками» (номер гос. регистрации 0109U007668).

Применение рекомендаций позволило:

- снизить расчетную мощность трансформатора, что предусматривает снижение номинальной мощности силовых трансформаторов или их загрузку при сохранении номинальной мощности;
- уменьшить сечения токопроводов, выполненных троллейными линиями или шинами по условию допустимой потери напряжения за счет применения напряжения 600 В в СЭК постоянного тока по сравнению с СЭК переменного тока 380 В в зависимости от используемого сечения;
- снизить удельные потери мощности в токопроводах, выполненных троллейными линиями или шинами;
- повысить показатели качества электроэнергии и электромагнитной совместимости систем питания кранов с частотно-регулируемым приводом на постоянном и переменном токе.

Вывод: предложенные рекомендации, полученные в результате научных разработок заслуживают внимания и позволяют проектировать системы электропитания кранов на постоянном токе с частотно-регулируемыми приводами, которые обладают более высокими технико-экономическими показателями по сравнению переменными.

От ЗНТУ :
Зав. кафедрой ЭПП,
проф. Метельский В.П.

проф. Андриенко П.Д.

От ГП «ГИПРОПРОМ»
Зам. директора
Телепайло С.А.

Главный специалист
группы электроснабжения
Тимошенко Д.И.


 Утверждаю:
 Зам. главного энергетика
 ОАО «Запорожсталь»
 И.М. Качеровский
 2015г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы Немыкиной Ольги Владимировны
 «Повышение эффективности систем питания кранов с частотно-регулируемым приводом».

Настоящий акт составлен о том, что ОАО «Запорожсталь» при реконструкции системы питания кранов цеха горячей прокатки тонкого листа (ЦГПТЛ) приняты к использованию рекомендации, которые позволяют снизить капитальные и эксплуатационные затрат в системе питания кранов с частотно-регулируемыми приводами.

Рекомендации разработаны на основе диссертационной работы Немыкиной Ольги Владимировны выполненной на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий» Запорожского Национального технического университета, в рамках государственной научно-исследовательской программы №01719 «Разработка методов оптимизации систем электроснабжения с полупроводниковыми преобразователями и электротехнологическими установками» (номер гос. регистрации 0109U007668).

Использование рекомендаций позволит следующее:

- оптимизировать загрузку силовых трансформаторов, питающих крановые троллеи кранов и снизить расчетную мощность трансформатора до 12 - 13 % в системах питания кранов постоянного тока с частотно-регулируемыми приводами;
- снизить эксплуатационные затраты за счет уменьшения потерь мощности в системе питания постоянного тока,
- повысить показатели качества электроэнергии и электромагнитной совместимости систем питания кранов на постоянном токе при использовании активного выпрямителя с двухсторонней проводимостью для крановых троллейных линий.

Вывод: Применить разработанные рекомендации возможно и для других цехов и участков предприятий аналогичного профиля.

начальник электротехнического отдела СГЭ
 ОАО «Запорожсталь»

Р.А. Савенко

Электрик ЦГПТЛ
 ОАО «Запорожсталь»

А.А. Антонюк