

Министерство образования и науки Украины  
Государственное высшее учебное заведение  
«Национальный горный университет»

На правах рукописи

ЛЫСЕНКО Александра Геннадиевна

УДК 622.62–83: 621.33

**РАЦИОНАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ТЯГОВОЙ СЕТИ ТРАНСПОРТА С  
ИНДУКЦИОННОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ ЭНЕРГИИ**

Специальность:

05.09.03 — Электротехнические комплексы и системы

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:  
академик НАН Украины,  
доктор технических наук,  
профессор Пивняк Г.Г.

Днепропетровск — 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
РАЗДЕЛ 1	
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	
1.1 Особенности системы транспорта с индукционной передачей энергии .....	11
1.2 Анализ характерных режимов тяговой сети.....	15
1.3 Оценка областей применения транспорта с индукционной передачей энергии.....	20
1.4 Постановка задачи исследования.....	21
Выводы.....	23
РАЗДЕЛ 2	
АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЯГОВЫХ СЕТЯХ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ	
2.1 Анализ особенностей установившихся режимов в тяговых сетях с распределенными параметрами.....	25
2.2 Оценка методов анализа переходных режимов линий с распределенными параметрами .....	30
2.3 Анализ существующих методов расчета режимов работы тяговой сети.....	35
Выводы.....	49
РАЗДЕЛ 3	
МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЯГОВОЙ СЕТИ ТРАНСПОРТА С ИНДУКТИВНОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ ЭНЕРГИИ	
3.1 Основные принципы моделирования тяговых сетей повышенной частоты.....	51

3.2 Начальные условия и допущения.....	58
3.3 Математическая модель режимов тяговой сети транспорта.....	62
3.3.1 Алгоритм расчета режимов тяговой сети.....	62
3.3.2 Расчетные модели режимов тяговой сети.....	65
3.4 Оценка адекватности полученных результатов моделирования.....	67
3.5 Оценка влияния режимов компенсации на эффективность функционирования тяговой сети.....	70
Выводы.....	76

#### РАЗДЕЛ 4

##### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПУСКОВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ «ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ – ТЯГОВАЯ СЕТЬ»

4.1 Постановка задачи и определение критериев оптимизации .....	78
4.2 Оптимизация пускового режима тяговой сети.....	84
4.3 Зависимости потерь мощности в тяговой сети при пуске.....	99
Выводы.....	113

#### РАЗДЕЛ 5

##### ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ТЯГОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

5.1 Оценка уровней высших гармоник тока и напряжения, генерируемых тяговыми преобразователями частоты.....	115
5.2 Определение дополнительных потерь мощности и энергии в системе электропитания горных предприятий.....	119
5.3 Экономический ущерб от снижения качества напряжения.....	123
5.4 Оценка искробезопасности тяговых сетей повышенной частоты...	133
Выводы.....	141

	4
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	143
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	146
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	155

## ВВЕДЕНИЕ

Энергетика является приоритетной отраслью экономики Украины. Важное место в обеспечении стабильного состояния энергетики занимает проблема сырьевых ресурсов. Добыча каменного угля для тепловых электростанций – залог энергетической безопасности страны. Как следствие, качественное обеспечение энергетической отрасли сырьем напрямую зависит от уровня развития угольной промышленности. Транспорт – одна из ключевых составляющих в обеспечении нормального функционирования угольных предприятий. Одним из перспективных видов рудничного транспорта являются бесконтактные электровозы, принцип действия которых основан на передаче энергии посредством электромагнитной индукции. Тяговая сеть для такого транспорта представляет собой линию с распределенными параметрами [64, 70], имеющую большое число сосредоточенных неоднородностей.

Бесконтактные тяговые сети находят сегодня все более широкое применение за пределами подземных горных выработок. Так, уже более 10 лет успешно эксплуатируются бесконтактные устройства для зарядки аккумуляторов муниципального электротранспорта мегаполисов Европы и США. Также перспективным считается использование бесконтактного транспорта в специальных промышленных условиях (транспортные магистрали карьеров, обогатительных фабрик, морских портов) [54, 64, 76].

Транспорт с индукционной передачей энергии имеет ряд преимуществ по сравнению с аккумуляторными и контактными электровозами. Эксплуатация таких установок технологически и экономически оправдана в особых условиях взрывоопасной окружающей среды. Много лет комплексы транспорта успешно функционировали на угольных шахтах, опасных по газу и пыли. Важным звеном системы бесконтактного транспорта является тяговая сеть. Ее энергетические показатели зависят от режимов работы системы в целом и могут быть повышены благодаря выбору рациональных режимов. Совершенствование расчета электрических режимов тяговых сетей транспорта приводит к повышению эффективности эксплуатации комплекса.

Особое внимание в данной работе уделено разработке рациональных режимов работы и поиску новых энергетически эффективных зависимостей системы «преобразователь частоты – тяговая сеть».

#### Связь работы с научными программами, темами

Диссертационная работа связана с выполнением бюджетных научно-исследовательских работ в области повышения коэффициента мощности тягового преобразователя частоты (ГП-331 № 0104U000773) и переоборудовании автомобильного транспорта (ГП-478 № 0115U002299).

В диссертационной работе решена актуальная научная задача, которая заключается в установлении закономерностей изменения режимов тяговой сети бесконтактного транспорта и обосновании выбора требуемых параметров режимов электропотребления с учетом состояния питающей сети и тягового преобразователя, что обеспечивает повышение эффективности работы транспорта за счет снижения уровня потерь и исключения перенапряжений. Реализация принятых решений приводит к снижению вероятности выхода из строя электрооборудования от повышения напряжения.

Цель работы – повышение энергетической эффективности работы тяговых сетей повышенной частоты и обеспечение допустимых значений напряжения.

Для достижения этой цели поставлены и решены следующие задания:

- разработать математическую модель параметров режима тяговой сети при вариации длин между компенсационными пунктами и емкости конденсаторов;
- исследовать параметры режима работы тяговой сети в пусковых и ненагруженных режимах;
- разработать методику выбора рациональных режимов работы комплекса с учетом вариаций выходных параметров тягового преобразователя частоты и параметров системы тяговой сети;
- обосновать методику выбора допустимого расстояния между компенсационными пунктами для исключения перенапряжений при прохождении электровозов;

- провести исследование электромагнитной совместимости и искробезопасности транспортного комплекса в условиях подземной системы электроснабжения угольной шахты;

- проверить адекватность и достоверность полученных результатов моделирования сравнением с экспериментальными данными.

Объектом исследования являются процессы передачи и потребления электроэнергии в системе «тяговый преобразователь частоты – тяговая сеть повышенной частоты» в пусковых и ненагруженных режимах сети.

Предмет исследования – режимные параметры тяговой сети как показатели энергетической эффективности функционирования комплекса, связи этих показателей с параметрами режима работы питающего преобразователя.

Методы исследования: численные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных – при моделировании электрических режимов тяговой сети, методы последовательной уступки, главного критерия и свертки – при нахождении оптимальных режимов работы тягового преобразователя, метод наименьших квадратов – при расчете потерь мощности в тяговой сети при пуске.

Идея работы состоит в использовании рациональных режимов пуска тягового преобразователя на сеть, которые получены путем имитационного моделирования, что позволит минимизировать потери электроэнергии в линии и повысить энергоэффективность работы комплекса.

### Основные научные положения и результаты исследования, их новизна

#### Научные положения:

- Интегральные значения потерь мощности и уровень напряжения в тяговой сети при пуске тягового преобразователя частоты определяются особенностями изменения волнового сопротивления линии и зависят от соотношения первичных параметров тока и времени его нарастания.

- Расстояние между пунктами продольной компенсации зависит от уровня напряжения, определяемого собственными параметрами линии и вносимого электровозами сопротивления с учетом ЭДС, индуцируемой в линию при прохождении электровоза.

#### Научные результаты исследований

- Разработана математическая модель определения параметров режимов тяговой сети транспорта с индукционной передачей энергии, которая учитывает, в отличие от существующих моделей, влияние параметра активной проводимости кабелей. Это позволяет определить зависимости токов и напряжений в тяговой сети в переходных и установившихся режимах.

- Теоретически обоснованы рациональные режимы тяговой сети за счет определения выходных параметров режима тягового преобразователя частоты в пусковом режиме, которые приводят к снижению потерь активной мощности и исключают перенапряжения.

- Установлена зависимость между скоростью нарастания выходного тока ТПЧ и длиной тяговой сети. При этом определены гранично допустимые значения этого параметра для обеспечения необходимых уровней напряжения при пуске ТПЧ.

- Разработан метод определения допустимого расстояния между пунктами компенсации, который в отличие от существующих учитывает ЭДС, которая наводится при движении электровозов, что позволяет повысить надежность компенсационных пунктов.

- Предложено оценивать уровни электромагнитной совместимости при помощи коэффициента передачи помехи, особенностью которого является учет помехи ТПЧ при установлении зависимости затухания нелинейных искажений кривой напряжения в системе электроснабжения шахты.

#### Практическое значение работы состоит в следующем:

- Разработан алгоритм определения рациональных параметров пускового режима тяговых частотных преобразователей с учетом характера

протекания электромагнитных процессов в линиях с распределенными параметрами.

- Предложена методика расчета допустимого расстояния между компенсационными пунктами с учетом вносимого электровозом сопротивления.

- Установлены зоны гранично допустимых значений скорости нарастания выходного тока ТПЧ при различных длинах тяговой сети, исключаяющие перенапряжения.

- Разработана методика оценки электромагнитной совместимости тяговых преобразователей частоты и шахтной системы электроснабжения с учетом удаленности точки подключения преобразователя к сети.

- Выполнен расчет экономической эффективности применения рациональных режимов пуска преобразователя при минимизации потерь мощности и числа пусков ТПЧ, при этом потери электрической энергии при предложенном алгоритме пуска снижаются на 30%.

- Результаты работы в виде методики определения потерь мощности при пуске преобразователей внедрены в «ДТЭК Павлоградуголь» при формировании и анализе режимов электропотребления подземного электровозного транспорта, а также в «НПЦ ДТЭК» при оптимизации пусковых режимов ТПЧ.

Обоснованность и достоверность научных положений и результатов подтверждена: совпадением теоретических и экспериментальных результатов с погрешностью в диапазоне 1,14 – 9,8 %; соответствием допущений, принятых в математических моделях и в моделировании; использованием современных методов решения задач, учитывающих характерные особенности волновых процессов в тяговых сетях.

Личный вклад соискателя состоит в постановке задач исследований, получении научных результатов и выполнении теоретической и практической части работы.

Личный вклад соискателя в работах, опубликованных в соавторстве заключается в установлении зависимостей потерь мощности при пуске ТПЧ на тяговую сеть; моделировании тяговых характеристик привода и обоснование энергетических коэффициентов; постановке задачи моделирование; разработке алгоритма расчета определения потерь мощности; обосновании исходных параметров ТПЧ при пуске; решение оптимизационной задачи относительно потерь мощности; обосновании шага транспозиции кабельной линии; определении показателей графика нагрузки; моделировании режима напряжения тяговой сети; расчетах высших гармоник тока.

Апробация результатов диссертации. Основные материалы и результаты, полученные в диссертационной работе, докладывались и были одобрены на научно-технических конференциях: научно-техническая конференция проблем электромеханических систем в горно-металлургическом комплексе (г. Днепропетровск, 2004 г.); вторая международная научно-практическая конференция «Энергосбережение в Украине: законодательство, теория, практика» (г. Киев, 2004 г.); «Кадровое обеспечение и новейшие технологии в сфере энергосбережения горной и металлургической промышленности» (г. Днепропетровск, 2005.) «Проблемы современной электротехники - 2006» (г. Киев, 2006.) VI международная научно-техническая конференция «Эффективность и качество электроснабжения промышленных предприятий» (г. Мариуполь, 2008 г.); четвертая научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная весна - 2013» (г. Днепропетровск 2013 г.).

Публикации. Научные результаты диссертации опубликованы в четырнадцати научных изданиях (из них три самостоятельно), в том числе в восьми статьях в специализированных научных изданиях Украины (одна из них в издании, которое индексируется в международной реферативной наукометрической базе научной периодики SciVerse Scopus), в трех статьях в международном издании, в трех статьях в сборниках научных трудов международных тематических конференций.

## РАЗДЕЛ 1

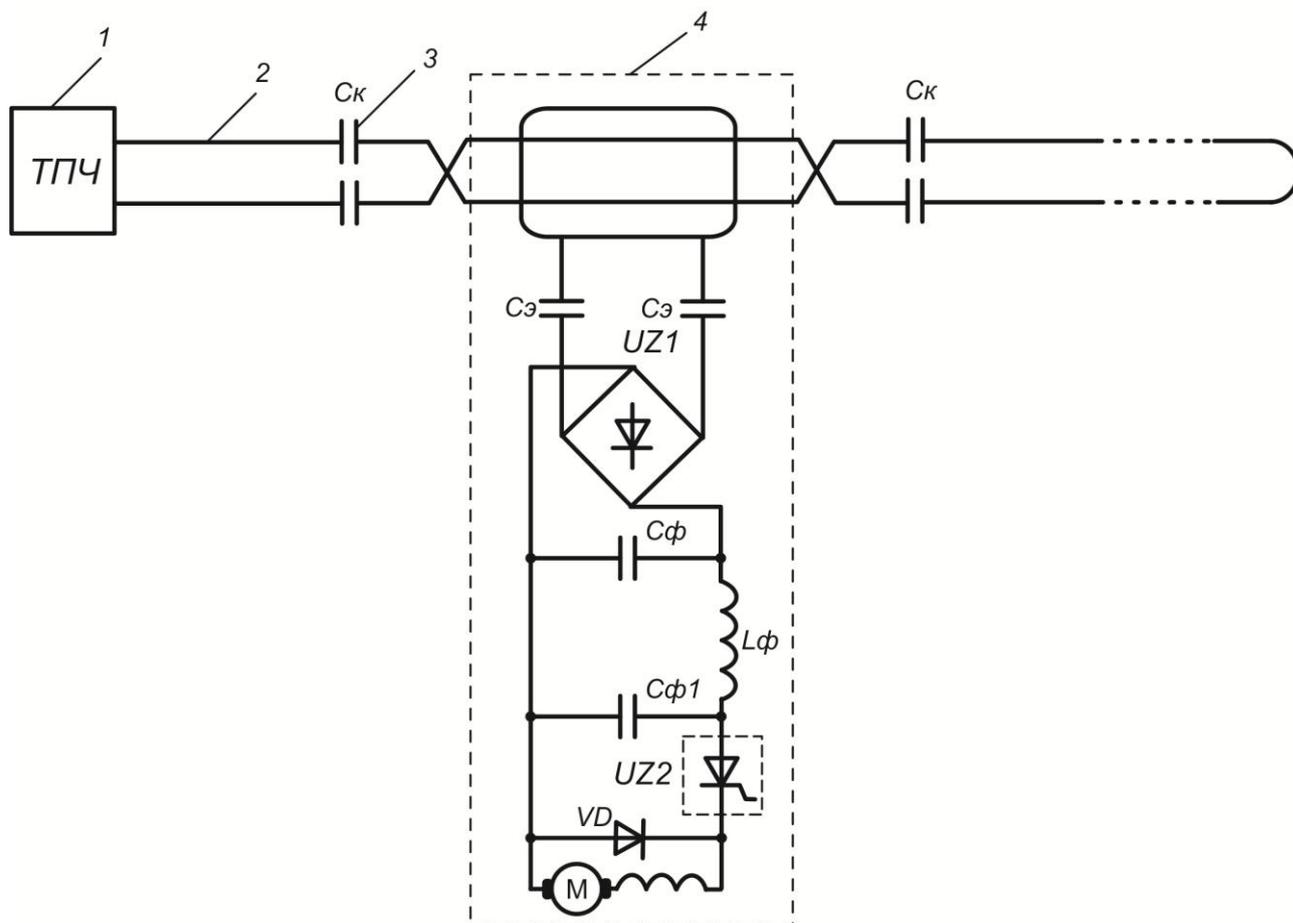
### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

#### 1.1. Особенности системы транспорта с индукционной передачей энергии

Объектом исследования диссертационной работы является тяговая сеть высокочастотного рудничного транспорта. В этом типе транспорта реализован электромагнитный принцип передачи энергии повышенной частоты на энергоприемник (электровоз). Система транспорта (рис. 1.1) состоит из источника питания (тягового преобразователя частоты) 1, передающего устройства (тяговой сети) 2 и приемника энергии (электровоза) 4. Приемником служит обмотка, уложенная в разомкнутый ферритовый сердечник. Сердечник обеспечивает достаточно сильную магнитную связь, несмотря на отсутствие гальванической связи между тяговой линией и энергоприемником. Источник питания – преобразователь трехфазного тока промышленной частоты в однофазный частотой 5 кГц. Тяговая сеть выполнена двумя (при двухпутевой откатке - четырьмя) специальными изолированными гибкими проводами типа КШСЛ, которые в конце замкнуты накоротко. Длина горной выработки может быть значительной, что приводит к увеличению индуктивного сопротивления на высокой частоте. Для компенсации индуктивности линии в расщелку провода последовательно включаются компенсирующие конденсаторы  $C_k$  – 3. Для их установки предусматриваются специальные ниши в породе. С целью обеспечения постоянства тяговых характеристик электровозов ток в тяговой сети стабилизирован по амплитуде и частоте [5, 11, 64].

Энергия от тяговой сети подается на энергоприемник, индуктивное сопротивление которого также компенсировано конденсаторами  $C_э$ . Режимы работы энергоприемника регулируются степенью настройки приемного контура в резонанс. Наибольшее значение энергии передается в нагрузку при

точной резонансной настройке контура. Наводимая в энергоприемнике ЭДС через выпрямитель, фильтр и регулятор поступает на тяговый двигатель М.



- 1 – тяговый преобразователь частоты (ТПЧ)
- 2 – тяговая сеть
- 3 – конденсаторы продольной компенсации
- 4 – электровоз

Рис. 1.1. Структурная схема системы транспорта с индукционной передачей энергии

Научные основы передачи электромагнитной энергии на расстояние бесконтактным способом для условий угольных шахт опасных по газу и пыли были разработаны научной школой академика НАН Украины Пивняка Г.Г. на кафедре систем электроснабжения Национального горного университета [5-7, 10, 14, 36, 47, 49, 53, 56, 60, 70, 75, 77].

Научные разработки по данному способу передачи энергии для условий угольных шахт проводились по трем взаимосвязанным направлениям:

1. Создание источников питания (тиристорных преобразователей частоты ТПЧ), обеспечивающих требуемую стабильность выходных параметров, хорошую динамику процессов регулирования и возможность работать с нагрузкой, изменяющейся в широких пределах. Работы по разработке тиристорных преобразователей частоты выполнялись Национальным горным университетом и Таллиннским электротехническим заводом им. Калинина под руководством профессоров С.А. Волотковского, В.А. Бунько, Г.Г. Пивняка, Е.И. Берковича [5, 6, 47, 49].

2. Работа по проектированию тяговой сети, расчету и выбору параметров электрооборудования, определение места подключения пунктов продольной компенсации. Кроме того, были рассмотрены вопросы искробезопасности и надежности транспортного комплекса при учете движения электровозов. Этим вопросам посвящены работы Ю.М. Зражевского, А.Я. Рыбалко, О.А. Свистельника, Е.И. Хованской, И.А. Шедловского [16, 56, 60, 70, 75, 77].

3. Научные разработки, касающиеся повышения эффективности систем регулирования привода тяговых электровозов и обоснования безопасных свойств комплекса шахтного электрооборудования и уровня взрывозащиты [10, 11, 14, 36, 53].

Однако, несмотря на большое количество кандидатских и докторских диссертаций, защищенных по данному направлению, существует ряд нерешенных вопросов. Данная работа направлена на поиск и разработку новых энергосберегающих режимов в самой энергоемкой части комплекса – тяговой

сети. Одна из специфик транспорта с индукционной передачей энергии – это стабилизация тока в тяговой сети по амплитуде и частоте. Режим стабилизации тока обеспечивается независимо от наличия электровозов на линии и их нагрузки. Таким образом, в тяговой сети имеет место стабильный уровень потерь мощности и энергии, которые обусловлены током 150 А.

Принцип действия и структура комплекса бесконтактного транспорта определяют ряд особенностей, имеющих принципиальное значение для решения вопросов повышения энергоэффективности системы.

Этими отличительными особенностями являются:

- Повышенная частота тока в тяговой линии 5000 Гц;
- Наличие пунктов продольной емкостной компенсации;
- Наличие пунктов транспозиции;
- Бесконтактная связь тяговой сети и приемного электровоза.

Анализируя работы, посвященные исследованию режимов передачи и преобразования энергии, протекающих в системе ТПЧ – тяговая сеть – электровоз, можно констатировать, что недостаточно исследованным является вопрос обеспечения наиболее рациональных, с точки зрения надежности и потребления электроэнергии, режимов преобразователя и тяговой сети.

Совершенствование системы рудничного транспорта с индукционной передачей энергии осуществлялось в течение продолжительного времени. Задача состояла в создании надежной системы с высокими технико-экономическими показателями. В настоящее время политика Украины направлена на разработку энергосберегающих технологий во всех отраслях производства. Поэтому актуальным является вопрос обеспечения энергоэффективных режимов работы комплекса высокочастотного транспорта. Поскольку его преимущества по сравнению с эксплуатируемыми в настоящее время на угольных шахтах страны другими транспортными системами создают предпосылки для дальнейшего развития и совершенствования.

Вышеупомянутые преимущества связаны в первую очередь с безопасностью (искробезопасный токосъем), а также с достаточно высоким

КПД. Таким образом, исследования, направленные на улучшение энергетических показателей высокочастотного транспорта, должны быть связаны с режимами работы его элементов электрооборудования.

Для разработки новых энергосберегающих режимов транспорта необходим подробный анализ электромагнитных процессов, протекающих в сложной системе ТПЧ – тяговая сеть – электровоз. По мнению автора, наиболее перспективным, с точки зрения энергосбережения, звеном в этой системе является тяговая сеть, поскольку изучению режимов этого элемента и его режимов до настоящего времени уделялось недостаточно внимания.

## **1.2. Анализ характерных режимов тяговой сети**

Научные исследования режимов тяговой сети выполнялись для установившегося режима [16] и переходного [70]. Определены и разработаны рекомендации по обеспечению рациональных установившихся режимов тяговой сети путем выбора компенсирующих устройств и их размещения в горной выработке по критерию минимального размаха напряжения.

Для обеспечения рациональных параметров переходных режимов было доказано, что недостаточно учитывать переходные процессы в инверторе преобразователя, а необходимо рассмотреть процессы в нагрузке – тяговой сети. Для этого было предложено рассматривать тяговую сеть как линию с распределенными параметрами, состоящую из ряда однородных участков с включенными неоднородностями [70]. Наличие активного сопротивления кабеля и активной проводимости изоляции обуславливает рассмотрение сети, как линии с потерями, особенно при отсутствии электровозов на линии.

Тяговая сеть системы шахтного транспорта с индукционной передачей энергии при анализе режимных параметров представляется в виде длинной линии с распределенными параметрами. Характерной особенностью в данном случае является наличие последовательно включенных батарей конденсаторов, которые считаются сосредоточенными неоднородностями. Участки тяговой сети между пунктами КП рассматриваются как однородные линии с

распределенными параметрами. При разработке энергосберегающих режимов электроснабжения бесконтактного транспорта необходим детальный анализ возможных режимов и их параметров. Основываясь на исследования, проведенные ранее можно выделить следующие характерные режимы работы тяговой сети:

- Пусковой режим (пуск ТПЧ);
- Режим ненагруженной тяговой сети;
- Режим сброса-наброса нагрузки, который имеет место при изменении параметров нагрузки.

Каждый из указанных режимов имеет свои характерные особенности и свое математическое описание. Для критического анализа уровня научных исследований в каждом из указанных направлений рассмотрим каждый режим и его математическое описание.

#### *Пусковой режим*

При работе источника питания рассматриваемой системы транспорта существенную роль играют переходные процессы в цепи нагрузки, возникающие при включении и отключении тяговой сети или изменении режимов работы привода бесконтактных электровозов [16, 70]. Одним из наиболее важных режимов является пусковой режим преобразователя частоты. Необходимо отметить, что пуск преобразователя производится на линию без нагрузки, т е пусковые процессы будут зависеть исключительно от волновых свойств тяговой сети [64].

Процессы пуска имеют свои особенности в цепях с распределенными параметрами. Исследование переходных процессов в тяговой сети главным образом необходимо для определения допустимой величины тока при включении преобразователя частоты на тяговую сеть [49].

Решения системы уравнений, описывающей переходный процесс можно интерпретировать в виде двух волн, распространяющихся в противоположных направлениях. Для произвольного сечения однородного участка сети можно показать [2, 37, 64]:

$$\dot{U} = \dot{U}_{nad} + \dot{U}_{omr}, \quad \dot{I} = \dot{I}_{nad} - \dot{I}_{omr}.$$

Из [64] известно, что в любом сечении тяговой сети, за исключением компенсационных пунктов, как и в однородной линии, сопротивление для одной из волн (прямой или обратной) равно волновому, независимо от емкости компенсирующих конденсаторов и закона их размещения. При этом изменение прямой и обратной волн тока на компенсационном пункте определяется отношением половины падения напряжения на конденсаторе к волновому сопротивлению, а аналогичное изменение волн напряжения равно половине падения напряжения на этом конденсаторе [16, 64, 70].

При определении начального значения пускового тока исходят из того, что преобразователь частоты оборудован защитой от перенапряжений, реагирующей на мгновенное значение напряжения на выходе преобразователя. Уставка защиты выбирается из условия 10 % перегрузки по напряжению. Выбор начального значения пускового тока выполняют, исходя из длительности наиболее тяжелого состояния режима (обратная волна полностью отсутствует).

Это наибольшее мгновенное значение тока, при котором защита еще не срабатывает. Строго говоря, защита не успеет сработать, поскольку ее быстродействие несоизмеримо со временем действия перенапряжений при превышении рассчитанного значения тока. При расстоянии до первого компенсационного пункта, равном 0,4 км, время пробега падающей и отраженной волн составит  $10^{-9}$  с. За это время падающая волна дойдет до первого компенсационного пункта, преломится и будет распространяться до второго компенсационного пункта, а отраженная волна возвратится к источнику питания (входу тяговой сети). Естественно, что за время  $10^{-9}$  с ни одна из существующих защит не способна отключить преобразователь частоты. Поэтому, учитывая малую перегрузочную способность тиристорного преобразователя частоты, необходимо ограничивать начальное значение пускового тока до расчетного. Полученное значение тока является исходным

для расчета регулировочной характеристики выпрямителя преобразователя частоты.

Таким образом, необходимо отметить, что алгоритм пуска тягового преобразователя на сеть, который бы учитывал минимальный уровень потерь мощности и перенапряжений на конденсаторах отсутствует. Поэтому, учитывая частые пусковые процессы в системе транспорта, которые возможны при реализации эффекта «дремлющей сети» (перевод тяговой сети из режима стабилизации тока 150 А к пониженному значению при отсутствии электровозов на линии), вопрос обеспечения энергетически эффективных режимов при пуске чрезвычайно актуален и требует научной разработки.

#### *Режим ненагруженной тяговой сети*

Как было показано выше, тяговую сеть необходимо рассматривать как линию с распределенными параметрами. Изменение параметров режима в таких линиях описывается «телеграфными уравнениями». Сложность составления математической модели заключается в том, что тяговая сеть состоит из последовательного соединения однородных участков и компенсирующих конденсаторов (неоднородностей). При разработке модели был принят следующий подход [70]: падение напряжения на конденсаторах продольной компенсации принимается эквивалентным наличию источников ЭДС, подключенных в местах нахождения компенсационных пунктов.

Математическая модель ненагруженной тяговой сети была создана с целью получения зависимостей, которые позволяют рассчитать параметры режима при любых начальных условиях. Эти параметры дают возможность выбрать оптимальный с точки зрения энергоэффективности режим работы транспорта.

Система телеграфных уравнений, которая описывает изменение режимных параметров тяговой сети с конденсаторами продольной компенсации имеет вид [17, 68]:

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = L_0 \cdot \frac{\partial i}{\partial t} + R_0 \cdot i + \sum_{k=1}^m u_k \cdot \delta(x - x_k); \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = C_0 \cdot \frac{\partial u}{\partial t} + G_0 \cdot u \end{cases}$$

где  $u, i$  – соответственно мгновенные значения напряжения и тока в сечениях тяговой линии;  $L_0, C_0, R_0, G_0$  – первичные параметры линии;  $u_k$  – мгновенное значение падения напряжения на емкости продольной компенсации;  $k$  – номер компенсирующей емкости;  $m$  – число компенсирующих емкостей до рассматриваемого сечения;  $\delta(x-x_k)$  – дельта-функция:

$$\delta(x-x_k) = \begin{cases} 0 & x < x_k \\ 1 & x = x_k \\ 0 & x > x_k \end{cases}$$

Следовательно, параметры режима ненагруженной тяговой линии рассчитываются с учетом включения конденсаторов и некоторых обоснованных допущений.

Учитывая громоздкость математических зависимостей и отсутствие соответствующих сложности задачи аппаратных и программных средств в то время, когда проводились основные выкладки по расчету режимов тяговой сети, из системы телеграфных уравнений было удалено одно слагаемое – активная проводимость изоляции кабельной линии. При этом доказывалось, что точность расчетов при этом не снижается. Учитывая развитие современной компьютерной техники, а также требование точной резонансной настройки тяговой сети для передачи энергии на нагрузку, существующая математическая модель расчета переходных режимов требует уточнения и учета всех параметров для обеспечения максимальной точности определения режима напряжения.

#### *Режим сброса-наброса нагрузки*

Нагрузка тяговой сети представляет собой последовательно включенное с тяговой линией активное сопротивление. Особенность состоит в том, что точка включения нагрузки нестационарная, так как электровоз изменяет свое место положение в процессе движения. Нагрузка тяговой сети учитывается в математической модели путем введения одного слагаемого, которое отображает вносимое электровозом сопротивление [16, 70]:

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = L_0 \cdot \frac{\partial i}{\partial t} + R_0 \cdot i + \sum_{k=1}^m u_k \cdot \delta(x - x_k) + \sum_{j=1}^{N_3} i_{\text{вн}} \cdot z_{\text{вн}} \cdot \delta(x - x_{\text{вн}}); \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = C_0 \cdot \frac{\partial u}{\partial t} + G_0 \cdot u \end{cases}$$

где  $i_{\text{вн}}$  – мгновенное значение тока в сечении тяговой сети, где в данный момент находится электровоз;  $x_{\text{вн}}$  – координата соответствующего сечения;  $z_{\text{вн}}$  – вносимое электровозом сопротивление;  $N_3$  – число электровозов.

Режим сброса-наброса нагрузки однозначно связан с производительностью добычных участков и количеством электровозов на линии. Для разработки рациональных параметров режима необходима информация о грузопотоках.

Более интересны с точки зрения математического моделирования и оптимизации параметров являются пусковой и ненагруженный режим тяговой сети. Научная задача, которая решается в данной диссертационной работе, предусматривает разработку режимов работы тяговой сети, которые обеспечивает минимальные потери мощности и исключает перенапряжения на пунктах компенсации.

### **1.3 Оценка областей применения транспорта с индукционной передачей энергии**

Традиционно считается, что применение бесконтактного электрического транспорта наиболее оправдано в производстве, где искрение при открытом токосъеме может привести к взрыву (угольные шахты, химические и нефтеперерабатывающие производства). Аккумуляторные электровозы имеют в 2-3 раза меньшую производительность, по сравнению с бесконтактными, и считаются взрывопожароопасными при внутреннем замыкании пластин [64].

В настоящее время считается перспективным применение бесконтактной передачи энергии на электромобиль от подземного кабеля для реализации городского электрифицированного транспорта.

В США был создан электрический автобус с бесконтактным электропитанием. Тяговая сеть для этого электровоза заключалась в

разомкнутый магнитопровод и обтекалась током частотой 800 Гц от специального преобразователя. Магнитный поток линии замыкался через воздушный зазор и магнитопровод электроприемника.

В Германии в конце 90-х годов в Техническом университете Брауншвейга была создана система индукционного электропитания транспорта, в которой тяговая сеть состоит из секций длиной 40-60 м. Каждая секция питалась от отдельного преобразователя с выходной частотой 20 кГц [76].

С появлением электромобилей все более актуальным является вопрос быстрой зарядки аккумуляторных батарей. Сегодня уже разработаны и применяются станции бесконтактной зарядки аккумуляторов на повышенной частоте. Принцип передачи энергии при этом тот же, что и в системах бесконтактного транспорта. Все указанные примеры показывают интерес ученых во всем мире к идее бесконтактной передачи энергии, и подтверждает целесообразность разработки новых подходов и принципов к ее реализации.

Предпосылками дальнейших разработок бесконтактного электропитания является устранение механического контакта, упразднение наземной части электрической сети и исключение воспламенения рабочей среды при открытом искрении. Поэтому наиболее перспективная область внедрения бесконтактного транспорта – это условия среды, при которых применение неизолированной тяговой сети невозможно из-за взрывопожароопасности [64], а также для движения и зарядки городских электромобилей.

#### **1.4 Постановка задачи исследования**

Проведенный анализ состояния проблемы позволил выделить нерешенные вопросы при моделировании пусковых и ненагруженных режимах тяговой сети транспорта с индуктивной передачей энергии, что приведет к снижению потерь активной мощности и исключит перенапряжения. Показано, что мероприятия, связанные с обоснованием значения начального тока преобразователя при пуске и времени его нарастания можно отнести к

перспективным и малозатратным. Это и позволило сформулировать задания исследования:

- разработать математическую модель расчета переходных режимов тяговой сети с учетом активной проводимости изоляции;
- получить параметры пускового режима ТПЧ, учитывая множество реализаций параметров системы и преобразователя;
- решить задачу поиска параметров пускового режима, которые обеспечивают минимум потерь мощности и исключают перенапряжения;
- разработать метод определения расстояния между компенсационными пунктами.

Анализ литературных источников, отражающих результаты исследования режимов тяговой сети транспорта с индукционной передачей энергии, показал, что разработке алгоритмов пуска ТПЧ на тяговую линию с обоснованием энергетически эффективных параметров не уделялось достаточного внимания. В научных работах, проводимых до настоящего времени, были рассмотрены установившиеся и переходные процессы тяговой сети под нагрузкой и в холостом ходу. Однако современное положение дефицита энергоресурсов требует разработки новых подходов. Поэтому возник круг задач, подлежащих решению.

Таким образом, научная задача работы сводится к исследованию режимов тяговой сети с учетом взаимного влияния состояния системы и параметров преобразователя. Эффект от реализации предложенного способа – повышение электробезопасности путем исключения пробоя изоляции при пусковых перенапряжениях и снижение потерь активной мощности в сети.

Первым этапом работы при решении поставленной задачи является анализ всех возможных комбинаций режимов тяговой сети и преобразователя для обоснования реализации алгоритма пуска.

Следующий этап – разработка математической модели для поиска оптимального сочетания параметров пускового режима.

Решение поставленной научной задачи включает:

- исследование характерных для данного класса частотных преобразователей значений пусковых токов;
- разработка новой математической модели расчета переходных режимов ненагруженной тяговой сети с учетом параметров преобразователя и линии;
- получение аналитических зависимостей пусковых параметров тягового преобразователя, которые обеспечивают минимальные потери мощности в сети;
- получение зависимостей скорости нарастания выходного тока ТПЧ, которые исключают перенапряжения при пуске;
- формирование зависимостей для расчета рационального шага между компенсационными пунктами с учетом ЭДС, наводимой в тяговой сети при движении электровоза;
- учитывая эксплуатационные особенности работы ТПЧ и высокие требования к качеству напряжения, необходима разработка оценочных методов определения электромагнитной совместимости преобразователя с системой электроснабжения;
- оценку искробезопасности посторонних проводников с учетом пусковых переходных процессов для корректировки безопасного шага транспозиции.

## **Выводы**

1. Бесконтактный транспорт с индукционной передачей энергии до конца не исчерпал своих возможностей в горном деле, а также в транспортных магистралях других производств и городов. Поэтому задача развития и поиска энергоэффективных режимов работы основных элементов системы – тягового преобразователя и сети – актуальна и требует нового решения.

2. Известные модели расчета переходных процессов в пусковом и установившемся режиме неидеальны и имеют недостатки. Поэтому возможно

создание новых моделей с учетом большего числа исходных параметров, которые будут обрабатывать все возможные сочетания параметров ТПЧ и тяговой сети.

3. Процесс пуска тягового преобразователя обычно отстраивается от возможных перенапряжений на выходе ТПЧ, когда линия полностью разряжена. Задача разработки оптимального алгоритма нарастания тока в линии, который обеспечивает минимальный уровень потерь мощности и исключает перенапряжения, может претендовать на новый научный результат.

4. Решение задачи поиска рациональных режимов направлено на обоснование граничных значений скорости нарастания выходного тока ТПЧ. Задачу необходимо решить, используя современный математический аппарат с учетом уникальных особенностей данного класса электротехнических задач.

5. Перенапряжения, которые возникают на конденсаторах поперечной компенсации, зависят не только от собственных параметров тяговой сети, но и от ЭДС, которая индуцируется при движении электровоза. Поэтому вывод методики расчета расстояния шага между компенсационными пунктами с учетом динамики движения электровоза – актуальное и новое решение указанной проблемы.

6. Учет активной проводимости при моделировании переходных процессов в тяговой сети позволит повысить точность определения режимных параметров, следовательно, обеспечить точную резонансную настройку линии и конденсаторов, что особенно важно при передаче энергии от преобразователя на распределенную нагрузку.

7. Задачи обеспечения электромагнитной совместимости тяговых преобразователей и искробезопасности посторонних проводников являются составляющими комплексного решения поставленной научной задачи и работают на единый результат обеспечения энергоэффективных режимов транспортного комплекса с индукционной передачей энергии.

## РАЗДЕЛ 2

### АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЯГОВЫХ СЕТЯХ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ

#### 2.1 Анализ особенностей установившихся режимов в тяговых сетях с распределенными параметрами

Тяговая сеть представляет большое сопротивление для тока высокой частоты, поскольку ее индуктивное сопротивление пропорционально частоте тока. Во избежание чрезмерного повышения напряжения в линии реактивная составляющая падения напряжения отдельных участков тягового кабеля компенсируется конденсаторами, включенными в рассечку тяговой сети. Конденсаторы устанавливаются вдоль линии в компенсационных пунктах.

Тяговая сеть рассматривается как линия с распределенными параметрами и состоит из однородных участков с размещенными между ними сосредоточенными неоднородностями (конденсаторами продольной компенсации) [1, 2, 16, 18, 69, 70, 71]. Падение напряжения на конденсаторах полагается эквивалентным наличию источников ЭДС, подключенных в местах нахождения компенсационных пунктов [64, 70].

При эксплуатации комплекса с бесконтактными электровозами было выявлено, что в тяговой сети наблюдаются значительные перенапряжения, которые приводят к выходу из строя электрооборудования и снижают надежность функционирования транспорта. Это происходит по причине несогласованности некоторых параметров тяговой сети и тягового преобразователя частоты [69, 70, 77]. Все это приводит к ухудшению энергетических показателей и показателей надежности функционирования системы бесконтактного транспорта. Поскольку тяговая сеть представляет собой передаточное звено между преобразователем частоты и подвижным составом, очевидно, что пути решения существующей проблемы нужно искать в плоскости анализа режимов собственно тяговой сети. Такими режимами являются, в частности, пусковой режим, холостой ход линии, режим с

работающими электровозами. Каждый из указанных режимов имеет индивидуальные особенности протекания электромагнитных процессов в тяговой сети. Постановка задачи данной диссертационной работы предполагает исследование пусковых и установившихся процессов ненагруженной тяговой сети. Получение оптимальных параметров ее режима и тем самым повышения энергетической эффективности транспорта с индукционной передачей энергии в целом является актуальной научной задачей, решению которой посвящена работа.

Отдельные задачи моделирования режимов тяговой сети решались ранее. Были созданы математические модели тяговой сети для установившегося и переходного режимов [17, 18, 43 – 46, 71]. Последняя модель была реализована программно на языке Turbo Basic. Однако на современном уровне существуют более мощные и удобные для пользователей средства, позволяющие значительно сократить время решения задачи. Поэтому было принято решение о создании новой модели тяговой сети с использованием приложений MathCAD и Excel, которая как и модель [44] базируется на конечно-разностном представлении системы дифференциальных уравнений в частных производных и позволяет исследовать любые режимы тяговой сети. При составлении математической модели тяговая сеть была представлена в виде участков линии с распределенными параметрами с последовательно включенными сосредоточенными неоднородностями (места включения пунктов компенсации). Распределение напряжения вдоль линии определялось для исключения перенапряжений в линии при включении электровоза.

Результаты, полученные с помощью такой модели, свидетельствуют о зависимости изменения напряжения в тяговой сети от параметров компенсирующих устройств и мест их установки (рис. 2.1). Данные результаты будут использованы в дальнейших исследованиях режимов тяговой сети для определения перенапряжений на компенсационных пунктах и разработке рекомендаций по их исключению.

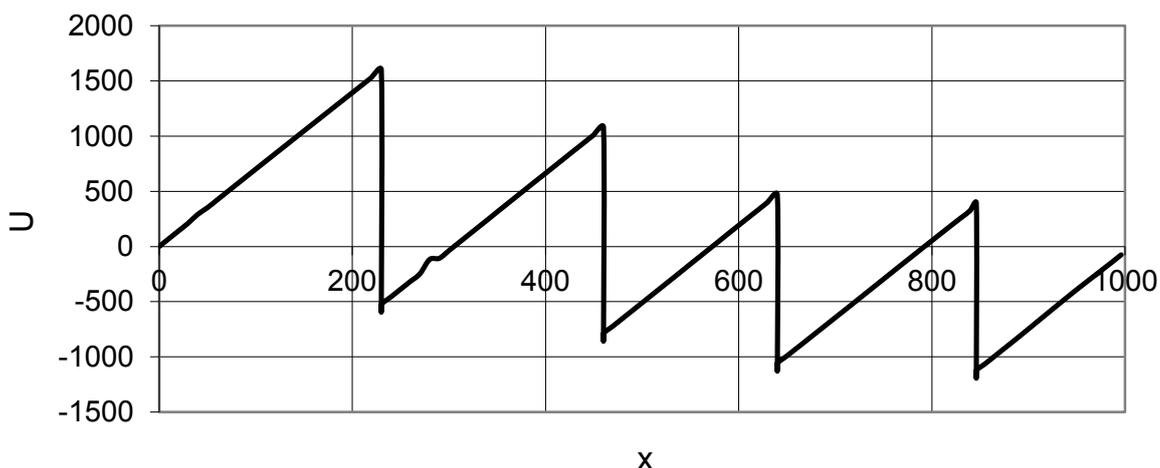


Рис. 2.1 Зависимость распределения напряжения вдоль тяговой сети длиной 1 км

Анализ зависимости напряжения вдоль тяговой сети длиной 1 км (рис.2.2, а) в течение трех периодов показывает, что наибольшие значения напряжения приходятся на первый компенсационный пункт. Следовательно, ставится вопрос о необходимости уточнения расположения этого компенсационного пункта с целью недопущения возникновения перенапряжений при включении нагрузки.

Распределения напряжения вдоль тяговой сети при длине выработки 2 и 4 км (рис.2.2, б, в) несколько сложнее, однако, явление наибольшего напряжения на первом компенсационном пункте сохраняется. Это подтверждает вывод о том, что наибольшая вероятность выхода из строя от перенапряжений у конденсаторов первого компенсационного пункта.

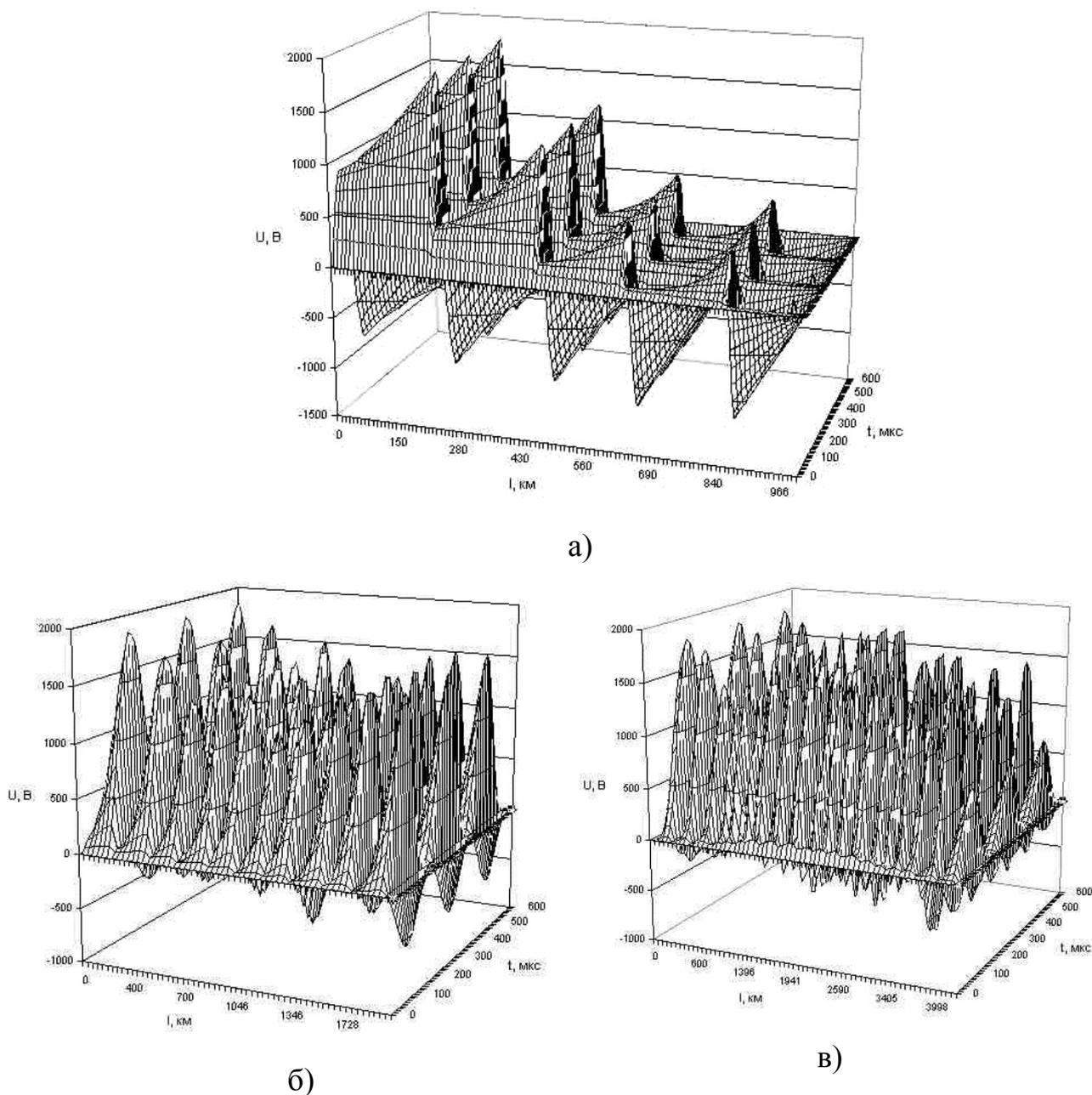


Рис. 2.2. Распределение напряжения вдоль тяговой линии:

а – длиной 1 км; б – длиной 2 км; в – длиной 4 км.

Анализ режима напряжения проведен для ненагруженной сети. Однако следует учесть, что в режиме сброса-наброса нагрузки от электровозов тенденция перенапряжений на компенсационных пунктах будет усиливаться. Связано это с электромагнитными процессами, происходящими в тяговой сети и обусловленными ее волновыми свойствами.

При движении электровоза в тяговой сети индуцируется ЭДС самоиндукции, что приводит к дополнительному повышению напряжения. Напряжение в каждом сечении тяговой сети с учетом значения ЭДС, наводимой электровозом не должно превышать допустимых значений с точки зрения надежности и безопасности функционирования комплекса. Из векторной диаграммы (рис. 2.3) видно, что вектор напряжения на линии  $U_L$  зависит от ЭДС, индуцированной приемным контуром  $E_L = I_L j \omega M$ , от падения напряжения на активных элементах сети  $I_L R_L$  и от вектора реактивной составляющей падения напряжения на реактивных элементах сети  $I_L j(x_L - x_C)$ , который в свою очередь зависит от степени компенсации индуктивности линии [54]. Отсюда следует, что снижение уровня напряжения на участках тяговой линии можно осуществить, снижая активное сопротивление тяговых кабелей (что произвести весьма сложно из-за особенностей их конструкции), также обеспечив режим резонанса напряжений в последовательной цепи (полная компенсация индуктивности линии).

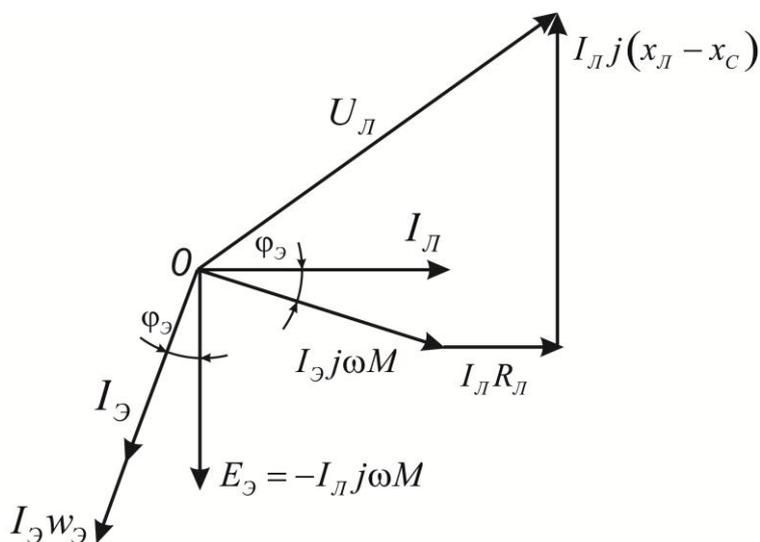


Рис. 2.3 Векторная диаграмма системы «тяговая сеть – электровоз»

Очевидно, что нагрузка, вносимая в тяговую сеть, еще больше усугубит картину неравномерности распределения напряжений, особенно при прохождении нагрузки через места установки конденсаторов. Таким образом, наиболее опасными с точки зрения возникновения перенапряжений являются компенсационные пункты.

## **2.2 Оценка методов анализа переходных режимов линий с распределенными параметрами**

Как было отмечено, тяговая сеть представляет собой линию с распределенными параметрами [25, 43-47, 71], имеющую большое число сосредоточенных неоднородностей. Моделированию режимов работы подобных сетей посвящено большое количество работ [17, 18, 43, 44, 45]. Однако разработанные модели несовершенны, поэтому научная задача, поставленная в данной работе, направлена на разработку рациональных режимов тяговой сети, для чего необходима корректировка моделей расчета переходных режимов с учетом современных методов и аппаратных средств.

Сложность моделирования тяговой сети обусловлена тем, что в ней присутствуют два вида неоднородностей: сосредоточенные в конкретных сечениях линии емкости продольной компенсации и вносимые электровозами сопротивления. Необходимость анализа режимов тяговой сети вызвана тем, что по данным эксплуатации опытного образца комплекса с бесконтактными электровозами в тяговой сети наблюдаются значительные перенапряжения, которые приводят в некоторых случаях к срабатыванию защиты, а в других – к выходу из строя компенсирующих конденсаторов [34, 35, 41, 73, 74, 43, 77].

Характер процессов в линиях с распределенными параметрами, имеющих на отдельных участках сосредоточенные неоднородности, весьма сложен и для подавляющего большинства случаев представить его аналитически в общем виде не представляется возможным. В месте включения неоднородности помимо прямых (падающих) и обратных (отраженных) волн тока и напряжения возникают преломленные волны, характер и значения параметров которых зависят от вида неоднородности [2, 4, 15, 20-23, 32, 33, 37, 70]. Неоднородность может быть связана с изменением типа линии (например, переход воздушной линии в кабельную). В этом случае процессы, происходящие при распространении электромагнитных колебаний, наиболее просто могут быть описаны аналитически лишь в случае линии без потерь с учетом коэффициента отражения, который зависит от первичных параметров линий [4, 31, 34, 64].

Разомкнутый, короткозамкнутый либо нагруженный конец линии также является неоднородностью на пути прохождения волн тока и напряжения. При этом отражение волны может быть полным либо частичным (с возникновением преломленной волны).

Дадим краткую сравнительную оценку известным методам анализа переходных режимов в линиях с распределенными параметрами, учитывая ограничения, которые накладывают уникальные сочетания параметров шахтного бесконтактного транспорта. Волновые методы расчета переходных процессов базируются на методе характеристик [8, 22, 23], который основан на замене дифференциальных соотношений вдоль характеристик разностными соотношениями. Аппроксимация волнового уравнения приводит к двум разностным уравнениям, связывающим напряжения и токи на концах длинной линии без потерь [70]:

$$\begin{cases} u_1(t) - z_B \cdot i_1(t) = u_2(t - \tau) - z_B \cdot i_2(t - \tau) \\ u_2(t) + z_B \cdot i_2(t) = u_1(t - \tau) + z_B \cdot i_1(t - \tau) \end{cases}, \quad (2.1)$$

где  $z_B = \sqrt{L_0 / C_0}$  – волновое сопротивление линии без потерь;  $\tau = l \times \sqrt{L_0 / C_0}$  – время пробега волны вдоль линии;  $L_0, C_0$  – первичные параметры линии;  $l$  – длина линии.

Система уравнений (2.1) должна рассматриваться совместно с граничными условиями линии [70]:

$$N_1[u_1, i_1] = f_1(t); \quad N_2[u_2, i_2] = f_2(t) \quad (2.2)$$

Если  $N_1$  и  $N_2$  – алгебраические операторы, то система уравнений (2.1) сводится к разностному уравнению, а если  $N_1$  и  $N_2$  – дифференциальные операторы, то процесс описывается дифференциально-разностными уравнениями [70, 71].

Известны методы расчета, основанные на замене дифференциальных уравнений линии разностными, в частности для линии, содержащей на конце индуктивность [8, 15, 22, 23, 58]. Здесь потери в линии учитываются сосредоточенными сопротивлениями, включенными на концах линии и равными  $R_0 \cdot l/2$ , где  $R_0$  – распределенное активное сопротивление,  $l$  – длина линии.

Разностные уравнения такой линии имеют вид:

$$\begin{cases} u_1(t) - a \cdot i_1(t) = u_2(t - \tau) - b \cdot i_2(t - \tau) \\ u_2(t) - a \cdot i_2(t) = u_1(t - \tau) - b \cdot i_1(t - \tau) \end{cases} \quad (2.3)$$

где  $\tau$  – время движения волны вдоль линии;  $a = z_0 + R_0 \cdot l/2$ ,  $b = z_0 - R_0 \cdot l/2$  – коэффициенты;  $z_0$  – волновое сопротивление.

Разностные уравнения линии рассматриваются совместно с дифференциальными уравнениями граничных условий. При этом уравнение записывается в виде:

$$D_p [i(t)] = e_1(t) - n_2 \cdot e_1(t - 2 \cdot \tau), \quad (2.4)$$

где  $D_p$  – дифференциально-разностный оператор.

Решение уравнения (2.4) однозначно определяется при задании начальных условий, которые должны находиться в области существования решения рассматриваемого уравнения. При допущении, что при  $t < t_k$  напряжения и токи были равны нулю, коммутация представляется скачкообразным возникновением ЭДС.

Конечно-разностные схемы, применяемые в описанном методе позволяют при записи разностных и дифференциально-разностных уравнений электрических цепей, содержащих линию с распределенными параметрами, определить область существования решения послекоммутационного уравнения.

Известен также аналитический метод исследования цепей с распределенными параметрами [8, 15, 22, 23], который основан на определении функциональных связей между падающими и отраженными волнами и применении дискретного преобразования Лапласа. Использование этого метода для линии, содержащей на конце сосредоточенную индуктивность, дает следующее уравнение [70]:

$$I^{*n}(q,e) = A(q,e) + \int_0^1 K(q,e,g) \cdot I^{*n}(q,g) \cdot dg, \quad (2.5)$$

где  $I^{*n}(q,e)$  – изображение отраженной волны тока;  $A(q,e)$  и  $K(q,\varepsilon,g)$  – сложные функции, зависящие от ЭДС, включенной в начале линии, волнового сопротивления линии, значения сосредоточенной индуктивности в конце линии, длины линии и скорости пробега волны вдоль линии;  $I^{*n}(q,g)$  – оригинал отраженной волны тока.

Результаты работы [70] при применении таких аналитических методов для более сложных цепей, содержащих на границе сосредоточенные элементы, показали, что граничные условия усложняются, и получить явные функциональные соотношения между падающими и отраженными волнами не представляется возможным. Отсюда следует вывод, что применение аналитических методов решения переходных процессов в тяговых сетях неприемлемо из-за особенностей волновых процессов, высокой частоты и наличия компенсации.

В случае невозможности применить аналитические методы, широко распространены численные методы решения подобных задач. Основная задача при решении уравнений в частных производных численными методами – выбор закона интегрирования [70].

Метод табличного моделирования [22, 23] предполагает алгебраизацию компонентных уравнений всех реактивных элементов схемы. При этом

алгебраизация производится на основании выбранного неявного метода численного интегрирования. Алгебраизированное уравнение приводится к виду:

$$i(t_{n+1}) = f(h, g_1, g_2, \dots, g_k) \cdot u(t_n + 1) + f_1(h, g_1, g_2, \dots, g_k), \quad (2.6)$$

где  $h$  - шаг интегрирования,  $g_1, g_2, \dots, g_k$  - параметры алгебраизируемой ветви и значения исходных токов и напряжений в ней,  $f$  и  $f_1$  - функции, конкретный вид которых определяется выбранным методом численного интегрирования и которые трактуются как проводимость  $G$  и источник тока  $J$ .

Применение такого численного метода целесообразно лишь в случае, если он позволяет вести интегрирование со значительно большим шагом, чем другие методы, не уступая им в точности, что связано с затратами времени на расчет.

При использовании метода синтетических схем системе с распределенными параметрами ставится в соответствие многополюсная синтетическая схема, эквивалентные (G-J) параметры которой определяются по параметрам цепочечной синтетической схемы замещения системы с распределенными параметрами. Значение внутренних переменных для такой модели определяется по значениям граничных для многополюсника токов и напряжений.

Методика позволяет рассчитывать переходный процесс в системах, содержащих десятки произвольно соединенных систем с распределенными параметрами при различных схемах замещения. Число операций, необходимое для реализации данной методики без учета особенностей схем замещения, пропорционально  $n^2 \cdot m$ , где  $m$  - число звеньев цепочечной схемы замещения системы с распределенными параметрами, а  $n$  - число входных узлов многополюсника, эквивалентирующего одно звено.

Достоинством описанной методики является возможность уменьшения временных затрат при использовании специфических свойств схемы замещения и значительном увеличении числа звеньев.

## 2.3 Анализ существующих методов расчета режимов работы тяговой сети

Замещение линии каскадным включением четырёхполюсников с известным приближением позволяет аппроксимировать "телеграфные" уравнения линии системой обыкновенных алгебраических уравнений. Точность подобной аппроксимации зависит от числа последовательно включенных четырёхполюсников и, следовательно, от порядка аппроксимирующей системы уравнений. Применение этого метода для расчетов тяговой сети с перемещающимися точками отбора мощности нецелесообразно из-за громоздкости результирующих моделей. При перемещении электровозов вдоль линии координаты точек отбора мощности изменяются и соответственно изменяются параметры четырёхполюсников, аппроксимирующих участки линии с отбором мощности, и параметры результирующего четырёхполюсника.

Область применения операторного метода ограничена линейными системами. Кроме того, при сложных граничных условиях и наличии неоднородностей нахождение оригиналов токов и напряжений превращается в весьма трудную задачу.

Метод бегущих волн имеет ряд модификаций и наиболее широко применяется при анализе электромагнитных процессов в линиях электропередач.

Первые попытки анализа электромагнитных процессов в линиях с распределенными параметрами обычно основывались на допущении неискаженного распространения [70]. Для того, чтобы рассмотреть поведение прямых и обратных волн, использовались геометрические методики.

Решение, полученное Даламбером, использовалось для расчета переходных процессов в неискажающих линиях при допущении, что если в какой-то точке линии произошло возмущение (включение, отключение, короткое замыкание и т.п.), то переходный процесс можно рассматривать на каждом из участков, на которые разбивается этой точкой линия [59].

Решение переходного процесса получается из отдельных решений на временных интервалах  $\Delta t = 2 \cdot \tau_k$  (поскольку возмущение, возникшее в точке "К",

достигнет начала линии в виде обратной волны в момент  $t = \tau_k$ , то до  $t = \tau_k$  состояние в начале линии определяется нормальным режимом). Характер изменения параметров режима в рассматриваемом сечении описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} u + z_B \cdot i = e^{-\beta \cdot \tau_x} \cdot V(t - \tau_x) \\ u + z_B \cdot i = e^{-\beta \cdot \tau_x} \cdot W(t + \tau_x), \end{cases} \quad (2.7)$$

где  $z_B$  - волновое сопротивление линии;

$V$  - прямая волна;

$W$  - обратная волна;

$\tau_x = x / v$ ;

$v$  - скорость распространения волны;

$\beta$  - коэффициент затухания.

Рекуррентные соотношения, описывающие переходный процесс на отдельных временных интервалах в начале линии и в точке "К" имеют весьма громоздкий вид, поэтому здесь не имеет смысла их показывать.

Общая последовательность вычислений может быть представлена следующей схемой:

$$i_1^1 \rightarrow u_k^1 \text{ и } i_k^1 \rightarrow i_1^2 \rightarrow u_k^2 \text{ и } i_k^2 \rightarrow \dots \rightarrow i_1^n \rightarrow u_k^n \text{ и } i_k^n.$$

Используя значения токов и напряжений в граничных точках, возможно получить решение переходного процесса в промежуточных сечениях линии. В этом случае число временных интервалов, на которых получается решение, удваивается по сравнению с числом интервалов для решения в граничных точках. Если интервалы времени, на которых получается решение в граничных точках, пронумерованы как  $1, 2, 3, \dots, n$ , то интервалы для промежуточных

точек линии будут пронумерованы  $1_1, 1_2, 2_1, 2_2, 3_1, 3_2, \dots, n_1, n_2$ . Уравнения для  $n_1$  и  $n_2$  интервалов имеют вид:

$$u_x^{n_1}(t) = 1/2 \cdot \left[ e^{-\beta \cdot (\tau_k - \tau_x)} \cdot V^n(t - \tau_k + \tau_x) + e^{-\beta \cdot \tau_x} \cdot W^n(t - \tau_x) \right]. \quad (2.8)$$

Здесь  $2 \cdot (n-1) \cdot \tau_k + \tau_x \leq t \leq 2 \cdot n \cdot \tau_k - \tau_x$ .

$$u_x^{n_2}(t) = 1/2 \cdot \left[ e^{-\beta \cdot (\tau_k - \tau_x)} \cdot W^{n+1}(t - \tau_k + \tau_x) + e^{-\beta \cdot \tau_x} \cdot W^{n+1}(t - \tau_x) \right]. \quad (2.9)$$

Здесь  $2 \cdot n \cdot \tau_k - \tau_x \leq t \leq 2 \cdot n \cdot \tau_k + \tau_x$ .

Недостатком описанного метода является возможность его использования только для неискажающих линий, либо линий, для которых выполнимо соотношение:

$$\delta^2 = 1/4 \cdot (R_0 / L_0 + G_0 / C_0)^2 \rightarrow 0.$$

Большой объем вычислений при расчете переходных процессов в линиях с распределенными параметрами обуславливает необходимость привлечения средств вычислительной техники. Первая хорошо известная программа вычислений электромагнитных переходных процессов для ЭВМ написана Доммелом.

Подход, предложенный Доммелом, заключается в следующем:

- компоненты сети, включая линии, моделируются обыкновенными дифференциальными уравнениями;
- обыкновенные дифференциальные уравнения интегрируются неявно за какой-либо временной интервал, используя правило трапеции;
- дискретизированный результат представляется для каждой компоненты эквивалентом Нортон;

- эквиваленты Нортона собираются и пошагово решаются результирующие уравнения узлов. Однако это способ приемлем только для линий без потерь, а при наличии последних создание эквивалентов Нортона затруднительно.

Анализ методов расчета, основанных на моделировании бегущих волн, а также моделировании частотно-зависимых параметров с помощью временных задержек и эквивалентов Нортона показал, что существующие алгоритмы моделирования для линий передачи с зависимыми от частоты параметрами по существу равнозначны уравнениям состояния и их численному интегрированию. Данный метод расчета электромагнитных переходных процессов пригоден лишь для однофазных и трехфазных линий без потерь.

Метод бегущих волн, разработанный Бьюлеем, положен в основу расчета с помощью временной таблицы [4]. Решение системы "телеграфных" уравнений представлено в виде:

$$\begin{cases} u = [F_1(x - c \cdot t) + F_2(x + c \cdot t)] \cdot e^{-\alpha t} \\ i = 1/z_B \cdot [F_1(x - c \cdot t) - F_2(x + c \cdot t)] \cdot e^{-\alpha t}, \end{cases} \quad (2.10)$$

где  $z_B$  - волновое сопротивление;

$c$  - скорость распространения волн;

$a$  - коэффициент затухания;

$F_1(x - c \cdot t)$  - прямая волна;

$F_2(x + c \cdot t)$  - обратная волна.

Для получения значений напряжений в узлах линии составляется временная таблица, в которой учитываются прямые и обратные волны. Достоинством этого метода является возможность учета влияния сосредоточенных емкостей, представленных в виде линий, получивших название С-линий, однако при этом существенным недостатком следует назвать применимость метода только к линиям без потерь. Возможность аналитического учета затуханий и искажений при более детальном описании

системы с использованием преобразования Фурье практически плохо реализуется из-за громоздкости вычислений, а в случае тяговой сети - вследствие наличия большого числа конденсаторов продольной компенсации и перемещающихся точек отбора мощности электровозами.

Существует обобщение алгоритмов, базирующихся на методе бегущей волны. Основой для такого обобщения служит способ описания процессов в линиях с распределенными параметрами с помощью уравнений с отклоняющимся аргументом. Описание процессов в отдельных точках линии (начало, конец, иные точки нарушения однородности линии) осуществляется с помощью уравнений с сосредоточенными параметрами, в которых эффект распределённости параметров передачи учитывается постоянным запаздыванием аргумента, соответствующим расстояниям между указанными точками. Допущением является то, что любую точку нарушения однородности параметров линии необходимо рассматривать в качестве граничной для отрезков линии, расположенных слева и справа от этой точки. Описанный метод получил широкое распространение для анализа процессов в линиях без потерь [71].

В линиях передачи сверхвысокого напряжения в расширенном виде применяется метод бегущей волны Бьюлея. При этом учитывается влияние поверхностного эффекта и возврата тока через землю [65]. Известно, что искажения, вызванные изменениями сопротивления земли, в переходных режимах существенно изменяют решение. Но учет искажений достаточно сложен и применяется лишь для малых временных интервалов (около десятка микросекунд). В тяговой сети переходный процесс длится в течение десятков тысяч микросекунд, в то же время, поскольку не заземлена нейтраль, отсутствует возврат тока через землю, [64]. Поэтому использование этого метода для исследования переходных процессов в сети недопустимо.

Метод бегущих волн при расчете переходных режимов применим для трехфазной воздушной линии. Исходными являются "телеграфные" уравнения линии, которые решаются методами преобразования годографа (для

однофазных линий), детерминанта четырехполюсника, характеристических чисел матрицы. Предпочтение отдается методу детерминанта. Однако этот метод может быть эффективно использован лишь для расчета холостого хода линии.

Несмотря на многообразие существующих методов расчета переходных процессов в однородных линиях, каждый из них ориентирован на применение в частных случаях. Поэтому эти методы не могут быть применены для анализа электромагнитных процессов в тяговой сети транспорта с индукционной передачей энергии. Это обуславливается тем, что тяговая сеть представляет собой линию с распределенными параметрами, имеет значительное число неоднородностей в виде сосредоточенных емкостей продольной емкостной компенсации, работает в режиме короткого замыкания и имеет нестационарные точки отбора мощности электровозами.

Расчет переходных процессов в линиях с неоднородностями.

Общего аналитического решения для линий с неоднородностями не существует кроме уравнений для линий без потерь, которые решаются тем или иным способом в зависимости от характера неоднородностей. Наиболее распространены задачи расчета переходных процессов в линиях, нагрузкой которых является сосредоточенный элемент, либо в узловых точках линий.

Для исследования переходных процессов в узловых точках используются "телеграфные" уравнения в операторной форме [70]. При этом допускается, что потери в линии весьма малы, поэтому справедливо:

$$z(p) = z = \sqrt{L/C} . \quad (2.11)$$

Полученное решение известно под названием решения в форме Даламбера с запаздывающими функциями. Оно позволяет получить численное решение для каждого узла в отдельности, используя на данном шаге решения падающие волны, найденные ранее для предыдущего момента времени.

После деления уравнений для прямых и обратных волн на  $z_{ij}$  и их суммирования получают выражение для эквивалентной волны:

$$u_i(t) + z_{\varepsilon i} \cdot i_1(t) = \sum_{j=1}^n V_{j1}(t) \cdot z_{\varepsilon i} / z_{ij} = V_{\varepsilon i}(t), \quad (2.12)$$

где  $z_{\varepsilon i}$  - эквивалентное волновое сопротивление линий, сходящихся

в узле  $i$ ;

$i_1(t)$  - полный ток узла  $i$ ;

$V_{\varepsilon i}(t)$  - эквивалентная волна напряжения в узле  $i$ .

Для определения напряжения и тока в узле  $i$  уравнение для эквивалентной волны дополняется уравнением связи между током и напряжением в узле с учетом времени распространения волны в линии:

$$i_1(t) = N_i [u_i(t)], \quad (2.13)$$

где  $N_i$  - оператор, связывающий напряжение  $u_i(t)$  с током  $i_1(t)$ .

Уравнения (2.12) и (2.13) представляют собой систему, из которой определяют напряжение в узле  $u_i(t)$  и ток  $i_1(t)$ .

После нахождения этих значений нетрудно найти обобщенные волны для всех  $n$  линий, отходящих от узла  $i$ . Эти волны могут быть найдены либо из общего решения для прямых и обратных волн, либо по выражениям, полученным из общего решения путем сложения или вычитания:

$$W_{ij}(t) = 2 \cdot u_i(t) - V_{ji}(t); \quad (2.14)$$

$$W_{ij}(t) = V_{ji}(t) - 2 \cdot z_{ij} i_{ji}(t). \quad (2.15)$$

Существенным недостатком описанного метода является его громоздкость и значительные временные затраты.

Методика, сочетающая применение концепций бегущих волн и многоскоростного распространения [65], позволяет достаточно просто при компьютерной реализации получить картину изменения параметров режима в любой точке линии, имеющей конечную длину и возврат тока через землю. Характеристика параметров режима в любой точке линии может быть рассмотрена как сумма  $N$  дополнительных ступеней, имеющих различные значения  $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$  с дополнительными задержками  $T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$ . Допускается использование принципа наложения, когда ступенчатая волна может быть разделена на следующие одна за другой волны, распространяющиеся с различными скоростями по линии и имеющими одинаковые коэффициенты затухания. Подобная методика может быть применена и для компенсированных линий в случае включения одной емкости посередине линии. Однако она применима только для исследования процесса включения источника питания. При рассмотрении режимов работы тяговой сети помимо пуска ТПЧ на сеть (включения) необходимо также исследовать и процессы сброса и наброса нагрузки, что с помощью рассмотренной методики выполнить не представляется возможным. Наличие большого числа емкостей продольной компенсации значительно усложняет применение этой методики расчета.

Для компенсированных линий сверхвысокого напряжения известны методы математического моделирования изменений состояния линии, связанных с пробоями разрядников конденсаторов [64]. Однако результаты, полученные с помощью этих методов, могут быть использованы только для настройки параметров защиты и не дают возможности описать переходные процессы в линии.

Метод, основанный на теореме разложения для расчета переходного процесса в линии с сосредоточенными неоднородностями, легко реализуется на компьютерной технике [15, 70]. Линия при этом замещается четырёхполюсником. Основным в расчете является определение системной функции, которая может быть выражена через входное сопротивление либо

передаточные отношения напряжения или тока. Однако недостатки замещения линии четырехполюсниками, отмеченные для однородных линий, ограничивают область применения этого метода для линий с неоднородностями.

Известно применение математического аппарата операторного исчисления для анализа процессов включения линии без потерь, нагруженной на емкость, на неизменное напряжение, где для получения решения применяется теорема разложения [2, 27]. Здесь рассматривается решение в форме блуждающих волн для различных моментов времени. Однако область применения подобного метода ограничена, так как отображается только характер процессов в линиях без потерь.

При моделировании процессов на компьютерной технике [63] имеется возможность рассмотреть длинную линию в виде модели цепочечной схемы, в узловой точке которой подключается сосредоточенная емкость. При этом должна быть рассмотрена совместная модель генератора и линии.

Очевидно, что при наличии большого числа сосредоточенных емкостей, нестационарных точек отбора мощности применение подобного метода анализа процессов в тяговой сети затруднительно и связано со значительными затратами аналоговых элементов и большой погрешностью.

Для моделирования тяговой сети транспорта с индукционной передачей энергии рассмотрим реализацию конечно - разностных схем для решения системы дифференциальных уравнений, описывающих процессы в однородной линии без потерь:

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = L_o \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = C_o \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \end{cases} \quad (2.16)$$

После интегрирования 1-го уравнения по переменной  $x$  получается дифференциальное уравнение 2-го порядка в частных производных:

$$-\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = L_0 \cdot \frac{\partial i}{\partial t \cdot \partial x}. \quad (2.17)$$

Подставив в (2.17) выражение для первой производной от тока по переменной  $x$ , получим:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = L_0 C_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}. \quad (2.18)$$

Уравнение (2.18) известно под названием "волнового".

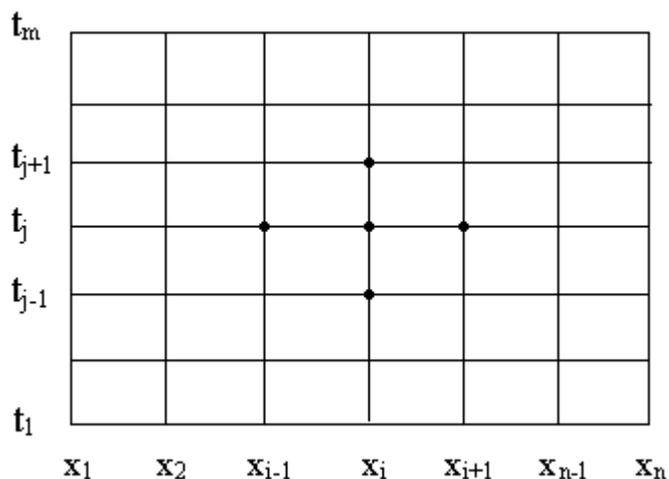


Рис. 2.4. Сетка для решения  $u_{xx} = L_0 C_0 u_{tt}$  на  $R$

Разобьем прямоугольник  $R\{(x,t): 0 \leq x \leq a, 0 \leq t \leq b\}$  на сетку, состоящую из  $(n-1) \times (m-1)$  прямоугольников со сторонами  $\Delta x = h$  и  $\Delta t = k$ , как показано на рис.2.4. Решение начинаем с нижнего ряда, где  $t = t_1 = 0$  и известно, что решением будет  $u(x, t_1) = f(x)$ . Используем метод конечных разностных уравнений, чтобы вычислить приближения  $\{u_{ij} : i = 1, 2, \dots, n\}$  в рядах для  $j=2, 3, \dots, m$ .

Действительное решение в точках сетки равно  $u(x_i, t_j)$ .

Зависимости центрированной разницы для приближающих функций  $u_{tt}(x, t)$  и  $u_{xx}(x, t)$  имеют вид:

$$u_{tt}(x,t) = \frac{u(x,t+k) - 2u(x,t) + u(x,t-k)}{k^2} + O(k^2), \quad (2.19)$$

и

$$u_{xx}(x,t) = \frac{u(x+h,t) - 2u(x,t) + u(x-h,t)}{h^2} + O(h^2). \quad (2.20)$$

Сетка равномерно располагается в каждом ряду  $x_{i+1} = x_i + h$  ( $x_{i-1} = x_i - h$ ) и в каждом столбце  $t_{j+1} = t_j + k$  ( $t_{j-1} = t_j - k$ ). Затем опускаем члены  $O(k^2)$  и  $O(h^2)$ , используем приближение  $u_{i,j}$  для  $u(x_i, t_j)$  в уравнениях (2.19) и (2.20), которые поочередно подставляем в (2.18). После этого получаем разностное уравнение:

$$\frac{u_{i+1,j} - 2u_{i,j} + u_{i-1,j}}{h^2} = L_0 C_0 \frac{u_{i,j+1} - 2u_{i,j} + u_{i,j-1}}{k^2}. \quad (2.21)$$

Умножим обе части уравнения (2.21) на  $k^2$  и заменим  $r^2 = \frac{k^2}{h^2 L_0 C_0}$ :

$$r^2 (u_{i+1,j} - 2u_{i,j} + u_{i-1,j}) = (u_{i,j+1} - 2u_{i,j} + u_{i,j-1}). \quad (2.22)$$

Выведем уравнение для нахождения ряда  $j+1$ :

$$u_{i,j+1} = (2 - 2r^2)u_{i,j} + r^2(u_{i+1,j} + u_{i-1,j}) - u_{i,j-1} \quad \text{для } i = 2, 3, \dots, n-1 \quad (2.23)$$

Четыре известные значения в правой части уравнения (2.23), которые используются для получения приближения  $u_{i,j+1}$ , показаны на рис. 2.5.

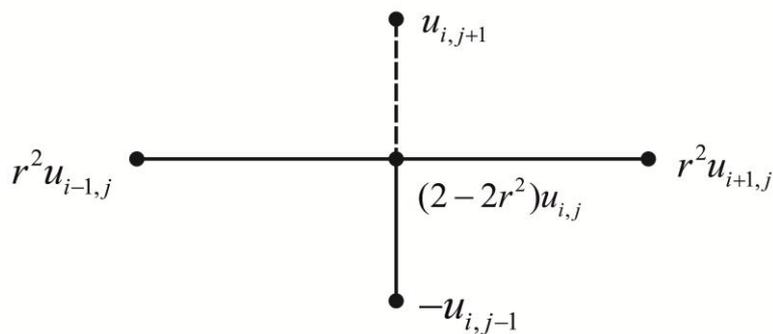


Рис. 2.5. Схема волнового уравнения

*Начальные значения*

Два начальных ряда значений, соответствующих  $j = 1$  и  $j = 2$ , подставляем в зависимость (2.23), для вычисления третьего ряда. Поскольку второй ряд обычно не задан, граничная функция используется, чтобы получить начальное приближение для второго ряда. Зафиксируем  $x = x_i$  на границе и применим формулу Тейлора 1 порядка для разложения  $u(x, t)$  в окрестности точки  $(x_i; 0)$ . Значение  $u(x_i, k)$  удовлетворяет:

$$u(x_i, k) = u(x_i, 0) + u_t(x_i, 0)k + O(k^2). \quad (2.24)$$

Используем  $u(x_i, 0) = f(x_i) = f_i$  и  $u_t(x_i, 0) = g(x_i) = g_i$  для нахождения числового приближения во втором ряду:

$$u_{i,2} = f_i + kg_i \text{ для } i = 2, 3, \dots, n-1 \quad (2.25)$$

Однако подобный подход также неприменим для расчета переходных процессов в тяговой сети, так как не позволяет учесть неоднородности.

Анализ методов расчета переходных процессов, приведенный в работе [70], показал, что применительно к тяговой сети бесконтактного электрического транспорта наиболее целесообразно применять численный метод прогонки, поскольку он практически всегда дает устойчивое решение и приемлемую для расчетов погрешность при незначительных затратах времени.

Такой подход был эффективно использован для расчета параметров пускового режима [25].

Математическая модель ненагруженной тяговой сети транспорта с индукционной передачей энергии представлена в следующем виде:

$$\begin{cases} -\partial u / \partial x = L_0 \cdot \partial i / \partial t + R_0 \cdot i + F_1(x, t) \\ -\partial i / \partial x = C_0 \cdot \partial u / \partial t + G_0 u, \end{cases} \quad (2.26)$$

где:  $u, i$  - соответственно мгновенные значения напряжения и тока в сечении линии;  $L_0, R_0, C_0, G_0$  - первичные параметры линии;  $F_1(x, t)$  - функция, которая отображает для каждого сечения тяговой сети особенности в виде включенных неоднородностей.

После преобразований с помощью метода конечных разностей получена модель в виде конечно-разностных уравнений [70].

Реализация этой модели с использованием метода прогонки осуществляется путем решения системы разностных уравнений:

$$\xi^2 \cdot (u_{i-1, k+1} + u_{i+1, k+1}) - a \cdot u_{i, k+1} = -F_{k, i}; \quad (2.27)$$

$$F_{k, i} = \xi^2 \cdot (u_{i-1, k+1} + u_{i+1, k-1}) - c \cdot u_{i, k-1} + d \cdot u_{i, k} + e, \quad (2.28)$$

где

$$\xi_i = \frac{\tau^2}{h_i^2};$$

$$a = 2 \cdot \xi^2 + \tau \cdot R_0 \cdot C_0 + 2 \cdot L_0 \cdot C_0 + G_0;$$

$$c = 2 \cdot \xi^2 - \tau \cdot R_0 \cdot C_0 + 2 \cdot L_0 \cdot C_0 + G_0;$$

$$d = 4 \cdot L_0 \cdot C_0;$$

$$e = 2 \cdot \xi^2 \cdot \sum_{k=1}^m (f_1 - 2 \cdot f_2 + f_3) \cdot u_{i, k},$$

где  $\tau, h$  – шаг интегрирования по переменной  $t$  и  $x$  соответственно,  $f_1, f_2, f_3$  – обобщенные функции.

Математическая модель разработана с учетом характера протекания электромагнитных процессов в тяговой сети безконтактного транспорта. Подстановка в математическую модель параметра удельной проводимости  $G_0$  объединяет все коэффициенты по проводимости, входящие в состав конечно-разностных уравнений. Точность данного допущения проверена сравнением результатов моделирования с данными эксплуатации опытного образца транспорта при численной подстановке параметров кабельной линии.

Таким образом, в результате алгебраизации и дискретизации системы дифференциальных уравнений в частных производных (2.26) получена система линейных уравнений в конечно-разностной форме (2.27) и (2.28).

Следующий этап математического моделирования – задание начальных и граничных условий. Начальные условия для момента времени  $t=0$ :

$$\begin{aligned} u(0, 0) &= 0; \\ u(x, 0) &= 0; \\ u_t(x, 0) &= du_0/dt. \end{aligned}$$

Начальное условие для первой производной от напряжения по времени:

$$du_0 / dt = I_0 \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot z_{ex}(t) \Big|_{t=0} = I_0 \cdot \omega \cdot z_{ex} \Big|_{t=0},$$

где  $I_0$  - амплитудное значение тока на входе тяговой сети,  $z_{ex}$  - входное сопротивление линии в момент времени  $t=0$ .

Граничные условия обусловлены короткозамкнутостью тяговой сети в ее конце и выходными параметрами тягового преобразователя частоты:

$$\begin{aligned} u(l, t) &= 0; \\ u(0, t) &= i(0, t) \cdot z_{ex}(t) = I_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot z_{ex}(t). \end{aligned}$$

Краткий анализ математического аппарата, необходимого для достоверного решения переходных процессов в тяговых сетях показал несостоятельность аналитических моделей расчета. Численные методы в свою очередь способны обеспечить лучший результат, и как показано в работе [70], метод прогонки дает наилучшие результаты. В развитие работы [70] и построения современных моделей тоже положим метод прогонки, однако отличительной особенностью является критическое отношение к уровню допущений и учет активной составляющей проводимости проводов сети.

Таким образом, оригинальностью разрабатываемой модели режимов ненагруженной тяговой сети является учет активной проводимости тяговой сети.

### **Выводы**

1. Выравнивание напряжений в высокодобротных линиях с распределенными параметрами является необходимым и должно быть учтено при проектировании тяговых сетей. Для тяговых сетей шахтного рельсового транспорта с индукционной передачей энергии неравномерность распределения напряжений может быть устранена только благодаря рациональному размещению компенсирующих устройств и обоснованию рациональных режимов пуска преобразователя.

2. Критический анализ методов расчета переходных процессов в линиях с распределенными параметрами, имеющих сосредоточенные неоднородности, показывает, что операторное решение и методика бегущей волны не позволяет учесть все компенсационные пункты вдоль тяговой сети. Это объясняется техническими особенностями данного класса сетей, уникальными режимами работы на распределенную нагрузку при передаче энергии.

3. Решение волнового уравнения с использованием встроенных математических функций современной вычислительной техники не позволяет учесть большое количество неоднородностей, присутствующих в тяговой сети. Поэтому новая математическая модель дает возможность рассмотреть

параметры режимов тяговой сети с учетом наличия ЭДС, вносимыми компенсационными пунктами и электровозами в пространстве и во времени.

4. Применение цепочечных схем при моделирование переходных процессов, используя современные математические приложения, позволяет рассмотреть линию с включенными в нее неоднородностями. Однако для тяговой сети применение подобного метода весьма затруднительно, поскольку требует значительных затрат времени и моделирующих элементов, а также обладает низкой точностью. Это неприемлемо при анализе высокодобротных цепей, где необходимо точно учесть резонансную настройку.

5. Для эффективного расчета параметров пускового режима бесконтактного электрического транспорта, учитывая особенности протекания электромагнитных процессов, наиболее целесообразно применять численный метод прогонки. Этот метод практически всегда дает устойчивое решение и приемлемую для расчетов погрешность при незначительных затратах времени.

6. Учет активной составляющей проводимости тяговой сети при моделировании переходных процессов ненагруженных тяговых сетей является развитием научных разработок в области анализа режимов линий с распределенными параметрами. Это позволило более критично определить допущения при моделировании и повысить точность результатов, что особенно важно при разработке рациональных режимов пуска сети и исключения перенапряжений.

## РАЗДЕЛ 3

### МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЯГОВОЙ СЕТИ ТРАНСПОРТА С ИНДУКЦИОННОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ ЭНЕРГИИ

#### 3.1 Основные принципы моделирования тяговых сетей повышенной частоты

Анализ существующих моделей раскрыл их достоинства и недостатки и показал необходимость создания адекватной математической модели для расчета параметров режима тяговой сети транспорта с индукционной передачей энергии в различных условиях работы, характерных для данного объекта исследования, учитывающей установившиеся и переходные режимы работы сети, а также пусковые режимы ТПЧ на тяговую сеть.

Методы математического моделирования сложных систем достаточно хорошо описаны [1, 2, 8, 16, 51, 52, 57, 61-63]. Создание математической модели тяговой сети для конкретных условий работы позволяет выявить слабые стороны системы, прогнозировать и исключить нежелательные или опасные режимы работы системы электроснабжения. Также отработка всех возможных режимов работы дает возможность выделить зоны с оптимальными (рациональными) параметрами режима. Поэтому наличие адекватной модели позволяет приступить к решению важных практических задач, связанных с анализом и интерпретацией количественных характеристик, полученных в результате моделирования.

Математическая модель реальной системы является абстрактным формально описанным объектом, изучение которого возможно математическими методами. При разработке модели производится такое упрощение реальной системы, при котором несущественные особенности системы отбрасываются и исходная задача сводится к упрощенной системе, поддающейся математическому анализу.

Преимуществом математических моделей является то, что они позволяют проверять эффективность принимаемых решений, не прибегая к практической

реализации. Для исполнения рекомендуются только решения, соответствующие поставленной цели, чем исключаются потери, связанные с реализацией неудачных вариантов.

Главным недостатком, возникающим при применении математических моделей, является неполная адекватность модели и моделируемой системы. Сложность и многообразие процессов функционирования сложных систем электроснабжения не позволяют строить для них абсолютно адекватные модели. Математическая модель, описывающая режимы работы тяговых сетей, учитывает только характерные закономерности, оставляя в стороне второстепенные факторы. Основное назначение модели – выполнить прогнозную оценку, абсолютно точное прогнозирование заведомо невозможно. Более того, часто бывает затруднительно получить точное описание начальной информации для моделирования.

В связи с этим, при применении метода математического моделирования, необходимо придерживаться определенного порядка. Правильный метод моделирования позволит получить адекватные модели.

Методы построения и решения моделей описаны в [16, 52, 58, 63]. Известно, что наиболее целесообразным является следующий порядок исследований: определение цели и постановка задачи исследования, организация исходных данных, определение начальных условий и допущений, выбор целевой функции и показателей эффективности, построение модели, решение модели, проверка полученного решения.

На начальной стадии определяется характер задачи и цели работы, предварительно оцениваются возможные результаты, производится сбор данных, обеспечивающих точное понимание задачи и соотношений между параметрами исследуемой системы.

На стадии постановки задачи следует уделить особое внимание созданию условий, необходимых для эксплуатации системы. Это особенно важно при проектировании транспортных систем горного предприятия, так как в связи с развитием горных работ конфигурация системы изменяется постоянно. Еще

один не менее важный вопрос, который необходимо рассмотреть на начальной стадии моделирования, связан с определением детализации разрабатываемой модели. Другими словами - необходимо определить совокупности характеристик и параметров моделируемой системы. Наиболее рационально выбрать такие функции, которые дадут исчерпывающий ответ о состоянии режима тяговой сети, а также будут сравнительно легко описаны математически.

Следующий этап моделирования связан с определением переменных исследуемой задачи. При разработке моделей тяговой сети транспорта для подземных горных разработок этими переменными могут быть: количество и мощность тяговых преобразователей частоты, длина тяговой сети, количество и шаг расстановки компенсационных пунктов.

К неуправляемым переменным относятся параметры, которые в процессе решения задачи остаются постоянными. Формирование неуправляемых переменных связано с наличием ограничений и требований к подземным электрическим сетям горных предприятий.

Наиболее сложной задачей исследования является выбор показателей эффективности и построение модели.

Критерий эффективности служит основой для оценки конкретных решений и выбирается в зависимости от цели задачи, ее природы и условий осуществления. С одной стороны - критерий должен быть достаточно прост, чтобы его легко было вычислить и анализировать, а с другой стороны - должен быть чувствителен к оптимизируемому значению параметра.

Для выбора рационального режима работы тяговой сети необходимо определить степень соответствия группы оптимизируемых параметров поставленной цели.

Цель определения рационального режима может заключаться в выполнении условия [36]:

$$f[R_i(T), C_i] \leq K(T), \quad i = 1, 2, \dots, p, \quad (3.1)$$

где  $R(T)$  - вектор состояния системы в момент времени  $T$ ;

$C_i$  - неуправляемые переменные модели;

$K(T)$  - значение критерия эффективности в момент времени  $T$ .

Выражение (3.1) определяет область в пространстве состояний, в которую должна войти траектория системы в конечный момент времени  $T$ .

Другой способ определения экстремума целевой функции может заключаться в требовании того, чтобы некая функция достигала предельно возможного, экстремального значения среди всех возможных значений управляемых переменных модели:

$$f[R_i(T), C_i] \rightarrow \min, \quad i = 1, 2, \dots, p, \quad (3.2)$$

Ясно, что подобная формализация имеет более общий характер, чем требования невыхода функции за заданные пределы.

Однако, достижение цели, сформулированной в виде (3.2), несколько сложнее достижения цели в виде области в пространстве состояний.

Действительно, во втором случае выборка управляющего решения закончится, как только будет найден хоть один вариант управляемых параметров системы, при котором соответствующая траектория  $R(T)$  войдет в допустимую ограничениями область.

В то же время в первом случае процесс выработки решения может закончиться только после установления факта, что не существует ни одного варианта решения модели, который дает лучшее значение целевой функции. Однако для установления этого фактора необходимо перебрать все возможные варианты решения, поскольку даже один пропущенный вариант может оказаться лучшим.

При разработке эффективных моделей системы электроснабжения для поиска рациональных режимов электропотребления, приходится иметь дело с несколькими критериями эффективности, то есть задача в данном случае имеет

многоцелевой характер. В качестве критериев эффективности могут быть приняты следующие параметры: общие затраты на сооружение системы электроснабжения, качество напряжения, надежность функционирования элементов тяговой сети, потери мощности и энергии в тяговой сети. Система также должна удовлетворять требованиям отраслевых нормативных документов, Правил устройств электроустановок и требованиям Правил техники безопасности. Оптимальное решение для подобных условий принимается не по одному, а по нескольким критериев.

Существуют следующие основные способы решения многокритериальных задач [24, 27, 39]: объединение нескольких показателей эффективности в один и сведение многоцелевых задач к одноцелевым.

В первом способе определяется комплексный критерий эффективности, который показывает, увеличение каких критериев желательно, а каких нежелательно. Частные критерии могут входить в комплексный критерий в виде слагаемых с некоторыми коэффициентами, определяющими их важность.

Особенностью комплексных критериев является то, что недостатки одного критерия могут быть скомпенсированы достоинствами другого и, как следствие это приводит к неверным выводам. Многоцелевые задачи можно свести к одноцелевым при помощи известных методов поиска основного критерия или уступок [24, 27, 39].

Метод основного критерия предполагает оптимизацию системы по одному главному критерию, а на остальные критерии накладываются ограничительные условия.

При использовании метода уступок, как и в методе основного критерия, решение оптимизируется по основному критерию  $K_0$ . После этого устанавливается допустимое отклонение  $\Delta K_0$  значения  $K_0$  от оптимального и проводится оптимизация системы по вспомогательному критерию  $K_1$  так, чтобы значение основного критерия  $K'_0$  не выходило за пределы  $K_0 \pm \Delta K_0$ . Затем устанавливается допустимое отклонение  $\Delta K_1$  для критерия  $K_1$  и

проводится оптимизация по критерию  $K_2$  при выполнении условий:

$$|K_0 - K'_0| \leq \Delta K_0; |K_1 - K'_1| \leq \Delta K_1, \text{ и т.д.}$$

Следующим этапом математического моделирования является построение математической модели тяговой сети.

Модель выражает взаимосвязь между управляемыми переменными, неуправляемыми переменными, технологическими параметрами и показателями эффективности.

На начальной стадии разработки модели, прежде всего, необходимо решить вопрос о возможности использования в рамках модели тех или иных показателей и соотношений. От правильного решения данного вопроса зависит адекватность модели.

Решением поставленной задачи могут быть модели различной сложности и чувствительности к управляемым переменным. Однако необходимо учитывать, что с усложнением модели увеличивается сложность расчетов, влияние главных факторов становится менее заметным из-за влияния большого числа второстепенных факторов. Поэтому ставится задача создать максимально простую модель, чтобы при этом не терялись свойства и параметры, относящиеся к задаче, и достигалось относительно быстрое и простое решение.

В символической форме записи модель системы можно представить в виде функции или множества функций, связывающих управляемые переменные  $X$ , неуправляемые переменные  $A$ , технологические параметры  $Y$  и показатели эффективности  $K$ :

$$K = f(X, A, Y). \quad (3.3)$$

В представленной форме записи показатель эффективности выражен в виде явной функции от других параметров системы, однако это не обязательно.

Конкретный вид соотношений (3.3), формирующих модель, определяется характером решаемой задачи. Для исследования электрических сетей

применяются два типа соотношений: нормативные и экспериментально статистические [40, 49].

Нормативные соотношения применяются в том случае, если исследуемую систему можно представить как ряд связанных, простых объектов, для описания которых известны функциональные зависимости. Нормативные данные обычно являются технологическими параметрами оборудования, составляющего систему электроснабжения, и являются следствием расчетов.

Построение и использование эмпирических соотношений затруднительно по следующим обстоятельствам: данные эксперимента могут оказаться непредставительными для вывода соотношений, характеризующих систему в изменившихся условиях текущего периода или в предполагаемых условиях будущего периода. Кроме того, эмпирические соотношения выводятся на основе данных, которые относятся к характеристикам функционирования системы, не отвечающим требуемому уровню эффективности. В этом случае решения, полученные с помощью модели, не приведут к повышению эффективности.

Задача осложняется также фактором неопределенности, что проявляется в результатах измерений и связано с погрешностью измерительных приборов, измерительных трансформаторов, и с тем, что существуют неконтролируемые параметры, изменение которых от опыта к опыту искажает характер полученных зависимостей.

Поэтому важным этапом моделирования электроэнергетических систем является определение и обоснование уровня допущений и начальных условий перед началом моделирования.

### 3.2 Начальные условия и допущения

При построении адекватной модели тяговой сети транспорта с индуктивной передачей энергии необходимо использовать достаточно жесткие ограничения на вид функции, представленной в зависимости (3.3), обоснованность которой может следовать только из понимания существа физических процессов, протекающих в исследуемой системе. Основным приемом является параметризация зависимостей (3.3), то есть использование предположения о том, что для  $K$  может быть дано описание в виде  $F(X, A)$ , причем вид функции  $F$  считается известным, а определению подлежат лишь параметры  $A$  [24, 27, 39].

Часто на практике применяется гипотеза предположения о линейности  $F(X, A)$ , то есть представление искомой записи в виде:

$$F = \sum_{j=1}^n A_j \cdot \varphi_j(x), \quad (3.4)$$

где  $\varphi_j(x)$  - заранее заданные функции.

Наиболее распространенным способом выбора параметров является метод наименьших квадратов [27], при котором этот выбор считается наилучшим, если он соответствует минимальному значению выражения:

$$I = \sum_{K=1}^N \left[ \tilde{F}_K - \sum_{j=1}^n A_j \cdot \varphi_j(x_K) \right]^2, \quad (3.5)$$

где  $x_K$  – значение вектора управляемых параметров измеренного в  $K$ -ом эксперименте;

$\tilde{F}_K$  – значение выходных параметров в  $K$ -ом эксперименте.

Условие минимума имеет форму так называемых нормальных уравнений, которые можно записать в следующем матричном виде:

$$AC = b, \quad (3.6)$$

где  $C = (C_j)$ ,  $A = \{a_{ij}\}$ ,  $b = (b_j)$ ;

$$a_{ij} = \sum_{K=1}^N \varphi_i(x_K) \varphi_j(x_K);$$

$$b_j = \sum_{K=1}^N \varphi_j(x_K) \tilde{F}_K, \quad i, j = 1, 2, \dots, n.$$

Таким образом, определение параметров  $C$  методом наименьших квадратов сводится к решению системы линейных уравнений. На конечном этапе построения модели должна быть дана точная аналитическая формулировка рассматриваемой задачи.

При таком подходе математическая модель исследуемой системы может быть представлена в общем виде следующим выражением [27]:

$$\left. \begin{array}{l} f(x_i, C_i) \rightarrow \min \\ \varphi_1(x_i, a_{ij}) \leq b_1 \\ \varphi_2(x_i, a_{ij}) \leq b_2 \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \varphi_K(x_i, a_{ij}) \leq b_K \\ x_i \geq 0; i = 1, n; j = 1, m \end{array} \right\}. \quad (3.7)$$

При построении модели необходимо обосновать уровень допущений, какие нужно сделать и разработать метод для решения задачи, чтобы применение модели было практически оправдано в отношении используемых вычислительных алгоритмов.

На этом этапе принимается решение о приоритете полученного результата. Имеется ввиду, что важнее определить – оптимальное решение приближенной задачи или приближенное решение точно сформулированной задачи.

Принято допущение: точное решение не оправдано самой постановкой задачи. Это связано, в первую очередь со степенью точности исходных данных. Например, если имеющиеся исходные данные известны с погрешностью 5%, то бессмысленно предлагать решения, обеспечивающие более высокую точность. Кроме того, приближенный ответ часто оказывается более эффективным, чем точный, но полученный позднее.

Заключительным этапом моделирования является логическая или экспериментальная проверка модели и полученного решения.

На этом этапе осуществляется сбор и анализ данных, необходимых для проверки правильности модели.

Адекватность модели до некоторой степени проверяется уже в ходе построения модели. Математические соотношения, существующие в модели, постоянно сопоставляются с исходной ситуацией.

Существует несколько аспектов проверки адекватности модели. Во-первых, сама математическая основа модели должна быть непротиворечивой и подчиняться всем обычным законам математической логики при вариации значений важнейших параметров. Во-вторых, справедливость модели зависит от ее способности адекватно описывать исходную систему. Для этого необходимо выяснить соответствует ли модель тем частным случаям, для которых уже имеются фактические данные.

Учитывая вышеизложенное, выделим особенности математической модели тяговой сети. Во-первых, представим сеть как линию с распределёнными параметрами, состоящую из однородных участков и включенных между ними сосредоточенных неоднородностей – ёмкостей продольной компенсации и вносимых электровозами сопротивлений, являющихся нестационарными точками отбора мощности. Во-вторых, используем «телеграфные» уравнения, которые описывают изменение параметров режима линий с распределёнными параметрами во времени и в пространстве. Математическая модель тяговой сети должна учитывать большое (неограниченное) число ёмкостей продольной компенсации, а также наличие и режимы работы электровозов.

Область функционирования рассматриваемой математической модели ограничена следующими, принятыми при её разработке, допущениями:

- тяговая сеть рассмотрена как однородная линия с последовательно-периодически включенными сосредоточенными неоднородностями;
- падение напряжения на конденсаторах продольной компенсации полагается эквивалентным наличию источников ЭДС, подключенных в местах нахождения компенсационных пунктов;
- активная проводимость утечки в конденсаторах продольной компенсации не учитывается из-за её незначительного влияния на погрешность расчёта при реальных длинах тяговых сетей.

Разрабатываемая математическая модель описывается системой дифференциальных уравнений с разрывными коэффициентами, что затрудняет решение указанной системы в её первоначальной форме. Поэтому приведенная в разделе 2 система дифференциальных уравнений аппроксимируется системой линейных уравнений в конечно-разностной форме, что позволяет упрощённо вести расчёты с погрешностью, не выходящей за пределы допустимой инженерной. Такой подход даёт возможность решать поставленную задачу в более простой и прозрачной форме, однако потребуются большой объем вычислений [22, 30, 42].

### **3.3 Математическая модель режимов тяговой сети транспорта**

#### **3.3.1 Алгоритм расчета режимов тяговой сети**

В качестве обобщения сформулируем кратко основные аспекты разработки алгоритма и особенности использованной математической модели [64, 70].

Математическая модель описывает тяговую сеть в динамике как линию с распределёнными параметрами, состоящую из однородных участков и включенных между ними сосредоточенных неоднородностей – ёмкостей продольной компенсации и вносимых электровозами сопротивлений, являющихся нестационарными точками отбора мощности. Особенностью разрабатываемой модели есть учет активных проводимостей кабеля, что повысит точность расчета переходных процессов.

Изменение параметров режима линий с распределёнными параметрами во времени и в пространстве описывается «телеграфными» уравнениями. Математическая модель тяговой сети учитывает большое (неограниченное) число ёмкостей продольной компенсации, а также определяет параметры пускового режима преобразователя при различных соотношениях пускового тока и параметров сети.

Область функционирования рассматриваемой математической модели ограничена допущениями, обоснованными в пункте 3.2.

Для расчёта параметров режимов тяговой сети с использованием вычислительной техники предлагается разработанный алгоритм.

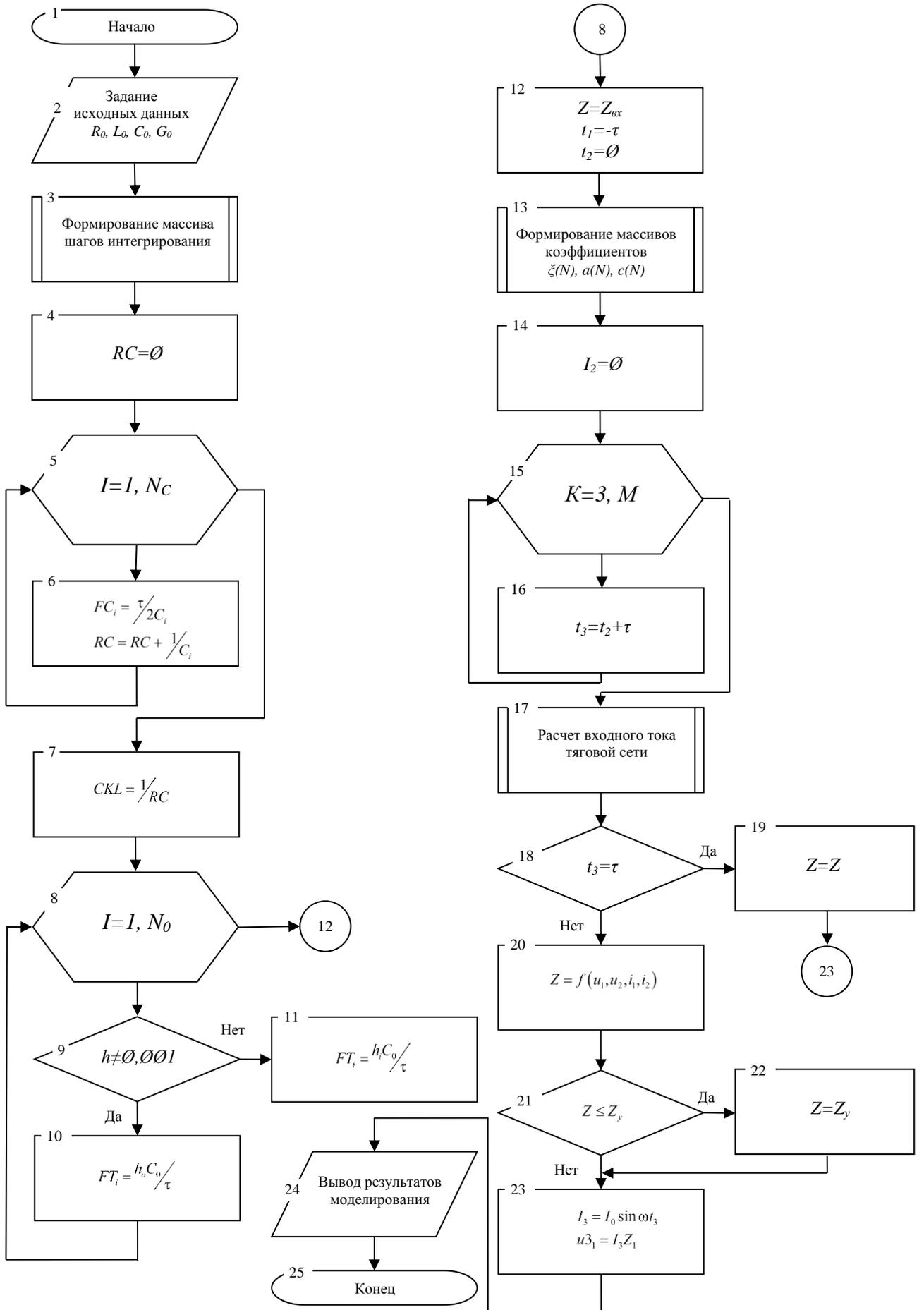


Рис. 3.1. Блок-схема программы расчета переходных режимов тяговой сети

Алгоритм расчета тяговой сети реализован в среде MathCad. Структурно программа состоит из трёх частей: раздел ввода и корректирования пользовательских данных, раздел реализации алгоритма расчёта, раздел вывода полученных результатов (Приложение А).

Ввод данных производится вручную при помощи изменения значений соответствующих переменных в областях, помеченных в программе, как области ввода пользовательских данных. Ввод параметров линии (длин участков, ёмкостей конденсаторов) может осуществляться как вручную путём редактирования соответствующей таблицы ввода (Input table), так и при помощи встроенной возможности Mathcad – импорта файлов в формате CSV. При этом импорт осуществляется в ту же таблицу ввода. Область ввода пользовательских данных в программе поделена на две части: в первой части представлены наиболее часто изменяемые параметры, относящиеся в первую очередь к первичным параметрам сети и режимов. Во второй части расположены параметры, которые для рассматриваемой тяговой сети зафиксированы жёстко, но могут изменяться при использовании программы для осуществления расчётов параметров режимов в других сетях и длинных линиях. Непосредственно реализация алгоритма расчёта режимов тяговой сети следует за разделом ввода пользовательских данных и содержит не только расчётные формулы и описания, но и вывод результатов промежуточных расчётов.

Вывод конечных результатов в виде таблицы и графиков находится в завершающей части программы и представлен таблицей  $mU$  (в строках – номер сечения, в столбцах – число микросекунд минус единица) и графиками  $u(t)$  при  $I=\text{const}$  и  $u(I)$  при  $t=\text{const}$ . Следует дополнительно отметить, что в среде Mathcad оказалось затруднительным реализовать нумерацию столбцов массива  $mU$ , начиная с минус 1. Поэтому было принято, что нулевой столбец соответствует условно принятому моменту времени  $t=-1$  мкс. Соответственно, необходимо учитывать, остальные моменты времени сдвинуты на одну микросекунду, что соответствует единичному шагу по времени.

### 3.3.2 Расчетные модели режимов тяговой сети

Для анализа работы представленной программы воспользуемся графическими зависимостями, построенными для различных режимов, моментов времени и координат (номеров сечений) представлены на рисунках 3.2–3.6.

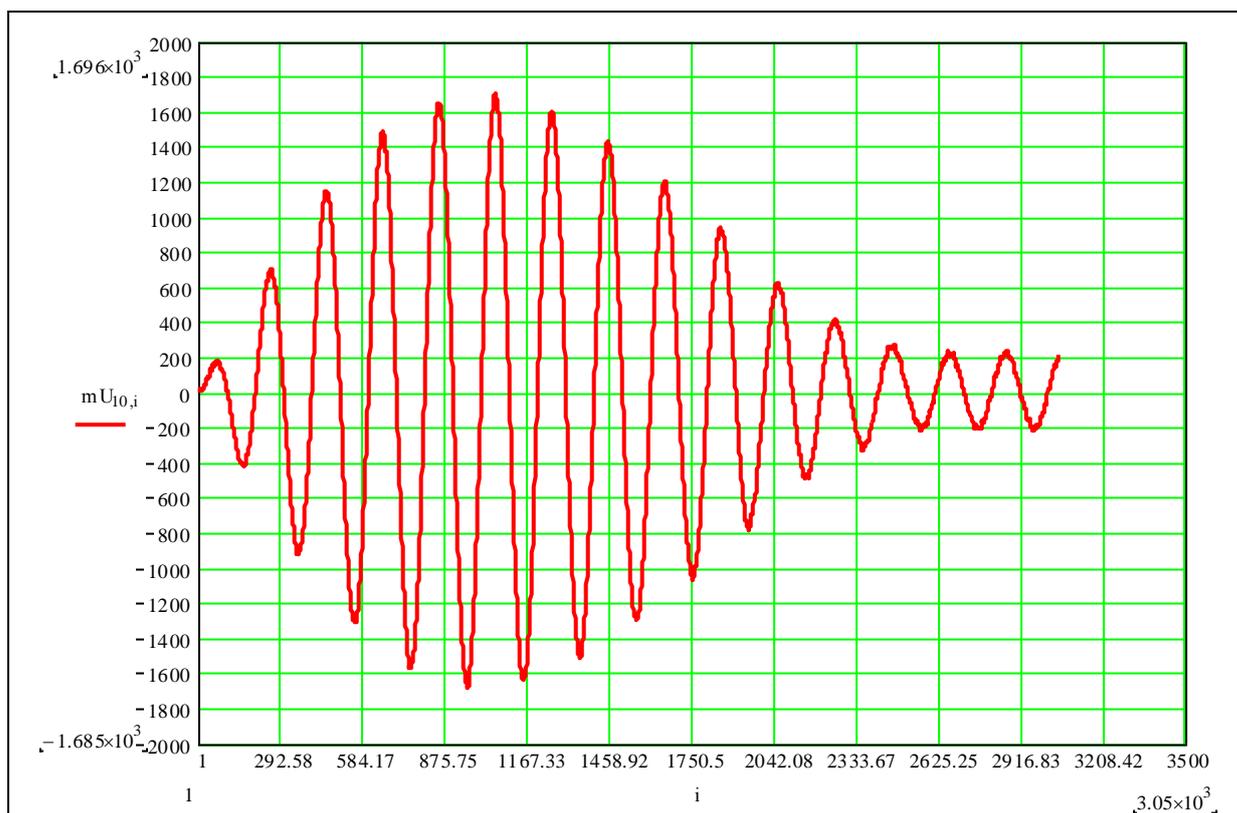


Рис. 3.2. Зависимость напряжения от времени в сечении 10 для линии длиной 1941 м (9 КП) в пусковом режиме

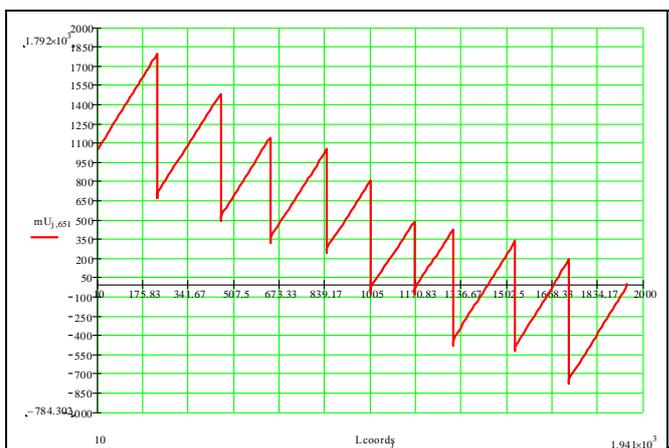


Рис. 3.3. Зависимость напряжения от длины линии при  $t=650$  мкс для  $l=1941$  м (9 КП) в установившемся режиме

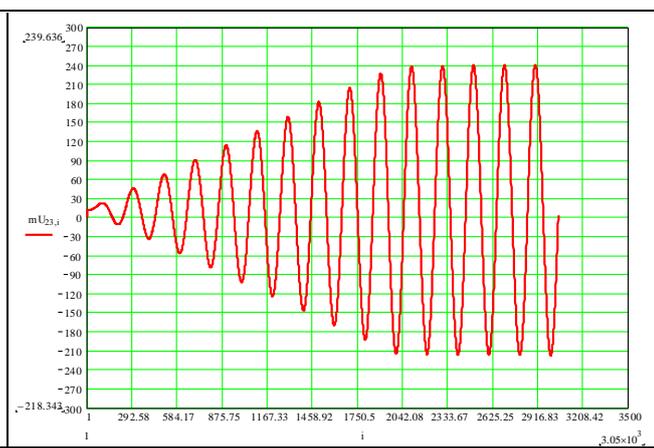


Рис. 3.4. Зависимость напряжения на первом компенсационном пункте (сечение номер 23) от времени для линии длиной 1941 м (9 КП) в пусковом режиме

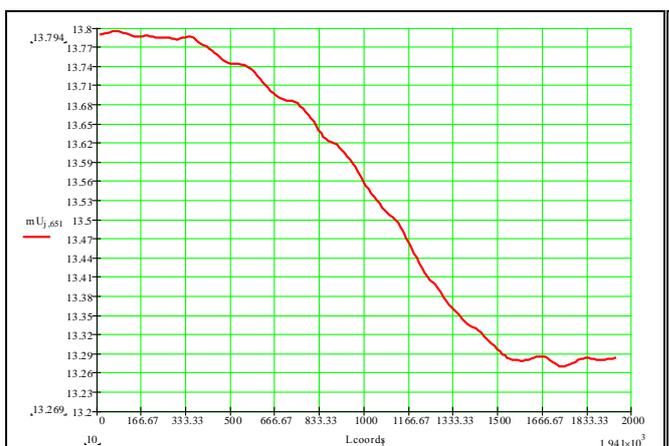


Рис. 3.5. Зависимость тока от длины линии при  $t=650$  мкс для  $l=1941$  м (9 КП) в пусковом режиме

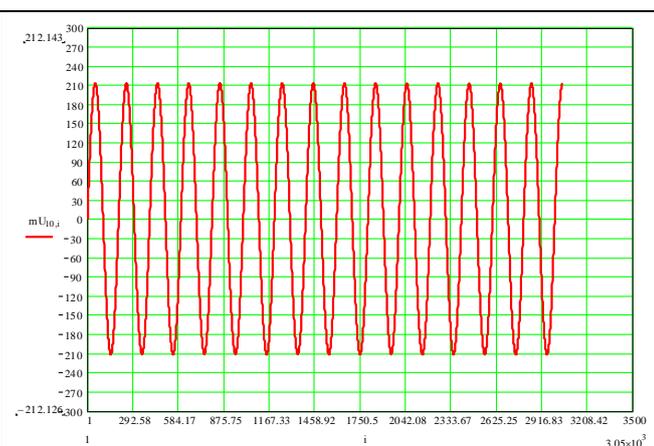


Рис. 3.6. Зависимость тока в сечении линии номер 10 от времени для  $l=1941$  м (9 КП) в установившемся режиме

### 3.4 Оценка адекватности полученных результатов моделирования

Адекватность полученных результатов оценивается в сравнении их с известными расчётными данными. При этом учитываются как форма кривой, так и отклонение полученных значений от известных в контрольных точках. Контрольными параметрами принимаются значения напряжений в начале линии и местах установки компенсационных пунктов (КП), а также значения тока в начале и в конце линии. Следует отметить, что в силу некоторых отличий реализации данного алгоритма от алгоритмов, которые были приняты при моделировании ранее [70], а также качественного увеличения точности расчётов, достигнутого при помощи использования современных вычислительных пакетов, не представляется возможным точно определить погрешность машинных расчётов и отклонение их от результатов, полученных ранее. Поэтому определяющим показателем адекватности следует считать форму полученной кривой, а также оценочные расчеты точности.

Отклонение параметров в контрольных точках оценивается исходя из выражения:

$$\Delta = \frac{\delta - \delta_p}{\delta_p} \cdot 100\% , \quad (3.8)$$

где  $\delta$  - значение параметра, полученное в результате измерений,  $\delta_p$  - расчетное значение параметра.

В качестве контрольных принимаются сечения, в которых установлены компенсационные пункты, и первое сечение линии.

Расчёт относительных погрешностей показал, что наименьшее значение погрешности наблюдается для значения напряжения в первом сечении линии. Тенденций изменения погрешности значения напряжения в зависимости от длины линии, момента времени, режима не наблюдается.

Среднее значение относительной погрешности, рассчитанное исходя из соотношения:

$$\Delta_{\text{cp}} = \left| \frac{\sum_{i=0}^n \Delta_i}{n} \right|. \quad (3.9)$$

Значения относительной погрешности для рассмотренных моментов времени колеблется в пределах 1,14 – 9,8 %.

Примеры графических зависимостей, полученных при помощи математического пакета сравнивались с результатами, полученными ранее [70]. Совпадение характера полученных кривых следует также считать доказательством адекватности построенного алгоритма.

Абсолютное значение средней относительной погрешности, (%):

$$\Delta_{\text{cp\_250\_уст}} := \left| \frac{\sum \Delta_{250\_уст}}{\text{length}(\Delta_{250\_уст})} \right| \quad \Delta_{\text{cp\_250\_уст}} = 1.14$$

$$\Delta_{\text{cp\_250\_пуск}} := \left| \frac{\sum \Delta_{250\_пуск}}{\text{length}(\Delta_{250\_пуск})} \right| \quad \Delta_{\text{cp\_250\_пуск}} = 3.574$$

$$\Delta_{\text{cp\_850\_уст}} := \left| \frac{\sum \Delta_{850\_уст}}{\text{length}(\Delta_{850\_уст})} \right| \quad \Delta_{\text{cp\_850\_уст}} = 4.819$$

$$\Delta_{\text{cp\_850\_пуск}} := \left| \frac{\sum \Delta_{850\_пуск}}{\text{length}(\Delta_{850\_пуск})} \right| \quad \Delta_{\text{cp\_850\_пуск}} = 6.912$$

$$\Delta_{\text{cp\_350\_уст}} := \left| \frac{\sum \Delta_{350\_уст}}{\text{length}(\Delta_{350\_уст})} \right| \quad \Delta_{\text{cp\_350\_уст}} = 3.828$$

$$\Delta_{\text{cp\_350\_пуск}} := \left| \frac{\sum \Delta_{350\_пуск}}{\text{length}(\Delta_{350\_пуск})} \right| \quad \Delta_{\text{cp\_350\_пуск}} = 4.442$$

$$\Delta_{\text{cp\_950\_уст}} := \left| \frac{\sum \Delta_{950\_уст}}{\text{length}(\Delta_{950\_уст})} \right| \quad \Delta_{\text{cp\_950\_уст}} = 3.582$$

$$\Delta_{\text{cp\_950\_пуск}} := \left| \frac{\sum \Delta_{950\_пуск}}{\text{length}(\Delta_{950\_пуск})} \right| \quad \Delta_{\text{cp\_950\_пуск}} = 9.785$$

### **3.5 Влияние режимов компенсации на эффективность функционирования тяговой сети**

Особенностью тяговой сети транспорта с индукционной передачей энергии является значительное реактивное сопротивление на рабочей частоте 5 кГц. Для компенсации применяется последовательное включение батарей конденсаторов (БК) в рассечку линии через определенное расстояние (продольная компенсация). Такой подход дает возможность снизить реактивное сопротивление линии а, следовательно, и снизить потери напряжения в ней. Кроме этого такой способ компенсации рассматривается как средство распределенного регулирования напряжения по длине тяговой линии, что дает возможность исключить режимы неравномерности распределения тока в тяговой сети. Отсюда следует, что основное преимущество продольной компенсации – обеспечение независимости передачи мощности в приемный контур (энергоприемник электровоза) при любой удаленности от питающей подстанции.

Вопрос создания математической модели, определяющей оптимальное количество КП, а также расстояние между ними возник в результате сложностей применения регулируемых батарей конденсаторов. Возможность использования регулируемых БК дает возможность менее критично относиться к требованию равного расстояния между пунктами КП при настройке сети в резонанс. Однако значительное количество пунктов компенсации приведет к повышению стоимости системы в целом.

Как показывают экспериментальные исследования и результаты, полученные на математической модели, наибольшие перенапряжения возникают на первом (по отношению к питающей подстанции) компенсационном пункте (рис. 3.7). Поэтому вопрос выбора оптимального местоположения КП особенно важен для обеспечения надежной работы всего комплекса.

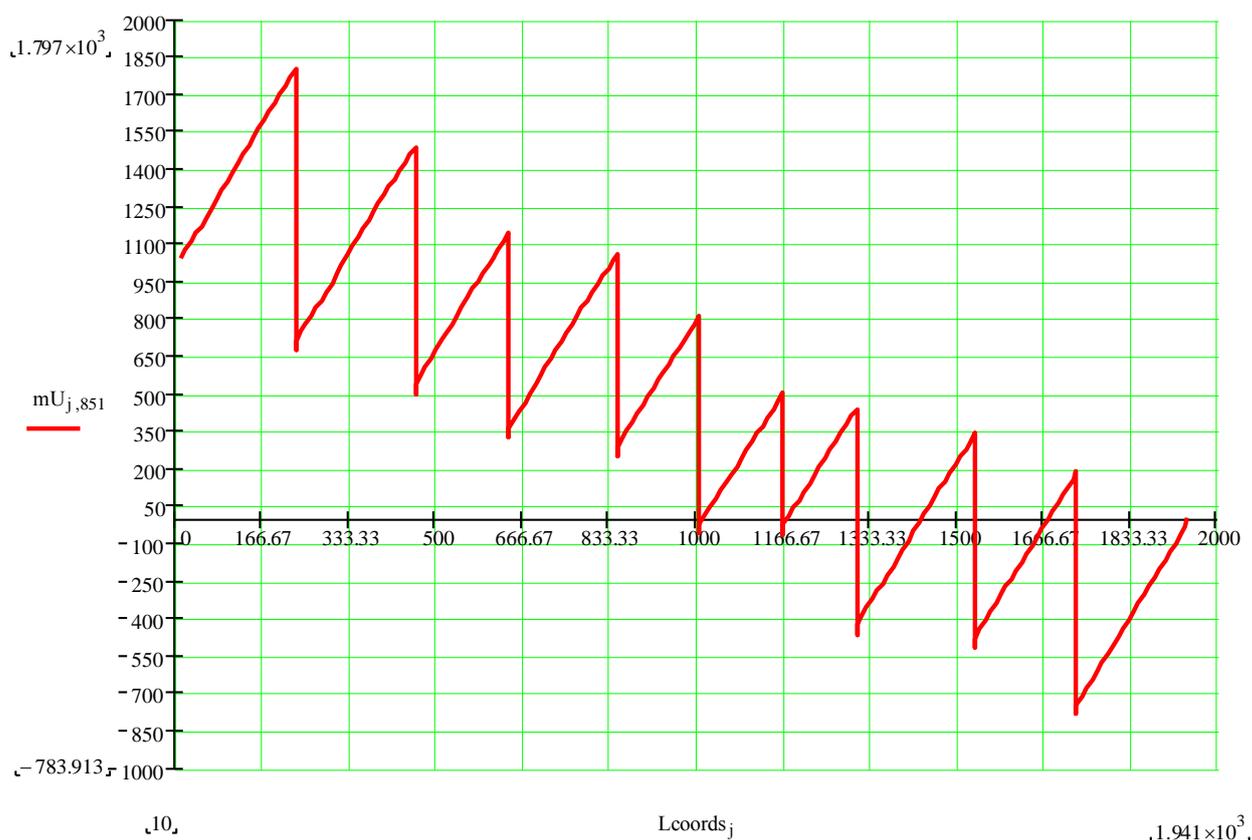


Рис. 3.7. График напряжения в сечениях тяговой сети (9 КП) для момента времени  $t=850$  мкс

Причиной возникновения перенапряжений на компенсационных пунктах является ЭДС самоиндукции, которая индуцируется в тяговую сеть при движении электровоза. Напряжение в любой точке тяговой сети является геометрической суммой напряжения источника и ЭДС самоиндукции, что необходимо учитывать при разработке методики расчета расстояний между КП. Существующие методы определения места расположения не дают удовлетворительных результатов с позиции исключения перенапряжений. Поэтому решение этого вопроса - актуальная научно-техническая задача, требующая решения.

Предусматривается, что компенсация индуктивного сопротивления тяговой сети осуществляется компенсационными пунктами, емкости конденсаторов которых равны. Ограничения, накладываемые требованиями безопасной эксплуатации комплекса электрооборудования транспорта,

приводят к тому, что расстояния между компенсационными пунктами тяговой сети должны быть незначительными и на опытных установках при частоте тока 5 кГц не превышать 0,4 км [64].

Кроме выравнивания напряжений на отдельных участках, важную роль в деле обеспечения безопасности эксплуатации транспорта играет напряжение на обкладках конденсатора относительно земли. Применение фазных напряжений позволяет сравнительно просто определить условия возникновения перенапряжений. При компенсации индуктивного сопротивления участка тяговой сети равным по значению емкостным сопротивлением конденсатора расстояние между компенсационными пунктами определится из условий резонанса напряжений  $X_L = X_C$ . При этом емкостное сопротивление конденсатора не должно превышать 5 Ом. Для параметров системы транспорта с электровозами В14 расстояние между компенсационными пунктами, определенное при таких требованиях, не превышает 0,25 км [64].

Известно, что допустимое расстояние между компенсационными пунктами определяется по зависимостям [64]:

– Максимально допустимое расстояние  $l_{к доп}$  между пунктами компенсации:

$$l_{к доп} = \frac{2U_{доп}}{IX_{0L}} \cdot 10^3 \text{ м} \quad (3.10)$$

Тяговая сеть оказывает большое влияние не только на технико-экономические показатели и безопасность высокочастотного транспорта, но и на его эксплуатационные свойства. Наличие компенсационных пунктов усложняет устройство тяговой сети. При большом количестве их приходится затрачивать много времени для нахождения неисправного конденсатора или устраивать дорогостоящую сигнализацию. Следовательно, желательно устанавливать компенсационные пункты на возможно большем расстоянии друг от друга.

На основании представленных формул было получено выражение для наибольшего допустимого расстояния между компенсационными пунктами:

$$l_{к доп} = \frac{0,8U_{доп}}{L_0 \sqrt{C_\omega f}} \cdot 10^3 \text{ м}, \quad (3.11)$$

где  $L_0$  – индуктивность тяговых кабелей, Г/км;

$C_\omega$  – постоянная, равная  $I^2 \cdot \omega$ .

Следовательно, допустимое расстояние между компенсационными пунктами определяется либо из условия безопасности эксплуатации комплекса, либо из условия исключения перенапряжений на обкладках конденсаторов [54].

Однако на практике в тяговой сети часто возникают перенапряжения, что неблагоприятно сказывается на работе всего комплекса транспорта [64, 70]. Это обуславливает необходимость уточнения этого расстояния и разработки методики, учитывающей изменение режима работы тяговой сети (включение нагрузки).

Условие исключения перенапряжения для ненагруженной тяговой сети:

$$U_{доп} \leq I_l \cdot r_0 \cdot l + jI_l \cdot x_l, \quad (3.12)$$

где  $I_l$  – ток в тяговой сети, в установившемся режиме ток поддерживается неизменным и составляет 150 А;

$r_0$  – удельное активное сопротивление проводов тяговой линии;

$x_l = x_{L0} - \Sigma x_c$  – реактивное сопротивление тяговой сети;

$x_{L0}$  – удельное индуктивное сопротивление тяговой сети;

$\Sigma x_c$  – суммарное емкостное сопротивление компенсирующих конденсаторов;

$l$  – длина тяговой сети.

Условие исключения перенапряжения для ненагруженной тяговой сети:

$$U_{\text{дон}} \leq I_l \cdot r_0 \cdot l + jI_l \cdot x_l + I_l \cdot R_{\text{вн}}, \quad (3.13)$$

где  $R_{\text{вн}}$  – вносимое электровозом (электровозами) сопротивление.

Допустимое действующее значение напряжения тяговой сети  $U_{\text{дон}} = 1650 \text{ В}$ . Запишем условие при допущении, что тяговая сеть не скомпенсирована и  $x_l = x_{L0} \cdot l$ :

$$U_{\text{дон}} \leq I_l \cdot r_0 \cdot l + jI_l \cdot x_{L0} \cdot l + I_l \cdot R_{\text{вн}}, \quad (3.14)$$

Отсюда расстояние между компенсирующими конденсаторами:

$$l_{\text{дон}} \leq \frac{U_{\text{дон}} - I_{\text{вн}} \cdot R_{\text{вн}}}{I_l (\sqrt{r_0^2 + x_{L0}^2})}. \quad (3.15)$$

Таким образом, определены зависимости, которые позволяют получить рациональные точки установки компенсационных пунктов, исходя из условия ограничения допустимых перенапряжений.

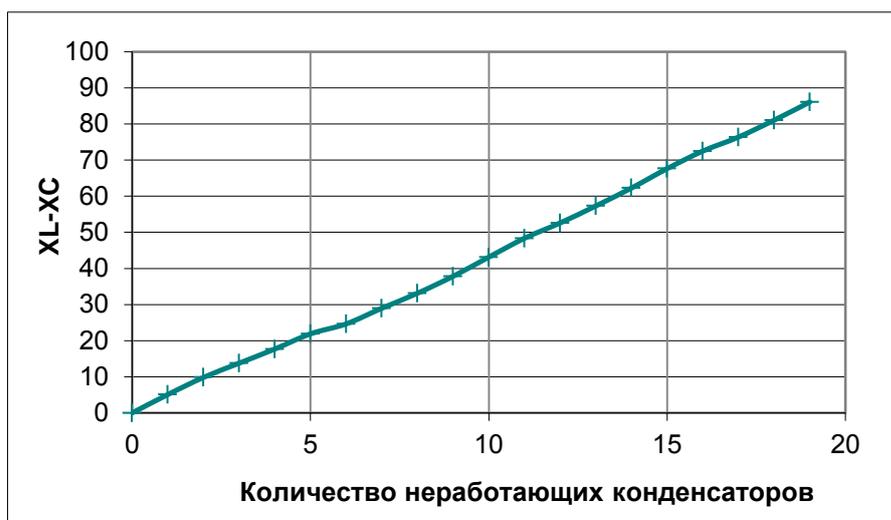
Эксплуатация опытного образца комплекса с бесконтактными электровозами [14, 36, 53, 56, 70] показала, что перенапряжения, которые наблюдаются в тяговой сети, приводят к срабатыванию защиты, а также к выходу из строя компенсирующих конденсаторов.

Выход из строя компенсирующих конденсаторов приводит к появлению реактивной составляющей сопротивления тяговой сети, а, следовательно, влечет за собой появление дополнительных реактивных потерь мощности, что негативно сказывается на энергоэффективности работы системы транспорта в целом.

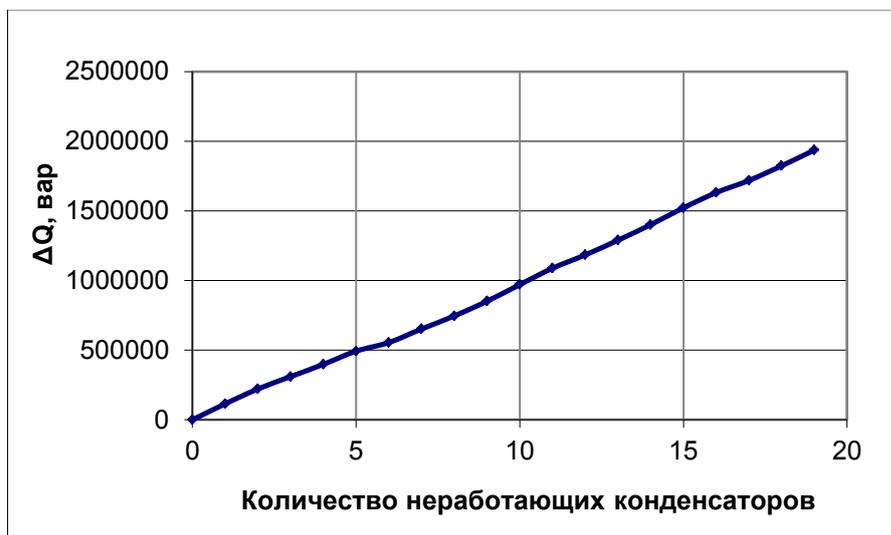
Реактивные потери мощности в тяговой сети можно выразить следующим образом:

$$\Delta Q = (x_L - x_C) \cdot I^2. \quad (3.25)$$

Очевидно, что чем больше разница  $(x_L - x_C)$ , т.е. меньше уровень компенсации, тем больше реактивные, а, следовательно, и полные потери мощности в тяговой сети. На рис. 3.8 показаны зависимости потерь реактивной мощности от числа вышедших из строя КП.



а)



б)

Рис. 3.8. Зависимости результирующего реактивного сопротивления (а) и потерь реактивной мощности (б) от числа вышедших из строя КП

## **Выводы**

1. В процессе решения поставленной научной задачи была разработана математическая модель для расчета параметров режима тяговой сети транспорта с индукционной передачей энергии. Отличительная особенность от существующих моделей заключается в возможности прогнозирования и исключения нежелательных или опасных режимов работы системы электроснабжения (токовых перегрузок или перенапряжений), а также в возможности выделения зон работы электрооборудования с оптимальными (рациональными) параметрами режима.

2. Уровень введенных при моделировании допущений определил: система дифференциальных уравнений аппроксимируется системой линейных уравнений в конечно-разностной форме, что позволяет упрощённо вести расчёты с погрешностью, не выходящей за пределы допустимой инженерной. Такой подход даёт возможность решать поставленную задачу в более простой и прозрачной форме, что не составляет существенных проблем при использовании современной вычислительной техники.

3. Путем численного решения дифференциальных уравнений, положенных в основу разработанной модели были отработаны возможные граничные значения режима напряжений тяговой сети при учете длины линии, числа компенсационных пунктов и начального времени. При подобной постановке задачи получены новые результаты, которые позволяют оценить и контролировать электрический режим тяговой сети при любых соотношениях начальных параметров, что было недоступно ранее.

4. Адекватность результатов моделирования оценивается при учете как формы кривой тока и напряжения, так и отклонение полученных значений от известных в контрольных точках. Контрольными параметрами являются значения напряжений в начале линии и местах установки компенсационных пунктов, а также значения тока в начале и в конце линии. Значения относительной погрешности для рассмотренных моментов времени находится в пределах 1,14 – 9,8 %.

5. Учитывая особенность электрических режимов тяговых сетей повышенной частоты и возможность частых перенапряжений возникает вопрос уточнения размещения конденсаторов продольной компенсации. Полученные зависимости определения рационального расстояния между компенсационными пунктами решают проблему максимального выравнивания напряжения вдоль тяговой сети и исключают режимы перенапряжений на пунктах компенсации.

6. Моделирование переходных процессов при пуске преобразователя для сечений, соответствующих точкам включения компенсационных пунктов позволяет прогнозировать опасные сочетания параметров сети, которые приводят к перенапряжениям на конденсаторах. Отличительной особенностью новой модели является учет номера сечения сети и времени затухания переходного процесса, что позволяет качественно отработать вопрос недопустимого повышения напряжения.

7. Математическая модель расчета режимов работы тяговой сети в ненагруженных и пусковых режимах даёт возможность отработать множество комбинаций исходных значений тока преобразователя и состояния тяговой сети. Учет активной проводимости кабеля при моделировании позволил доказать, что наиболее подвержены перенапряжениям конденсаторы первого компенсационного пункта, что должно быть учтено при эксплуатации комплекса.

8. Поскольку тяговая сеть транспорта является скомпенсированной, то энергоэффективность работы всего комплекса зависит от режима работы конденсаторов компенсационных пунктов. Зависимости, полученные на основе учета значения резонансной расстройки  $(x_L - x_C)$  элементов тяговой сети, позволяют оценить значение потерь реактивной мощности, а значит косвенно и энергоэффективность от числа вышедших из строя конденсаторов. Показано, что граничное значение дополнительных потерь реактивной мощности достигает 2000 кВАр.

## РАЗДЕЛ 4

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПУСКОВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ «ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ – ТЯГОВАЯ СЕТЬ»

#### 4.1 Постановка задачи и определение критериев оптимизации

В теории многокритериальной оптимизации решаются задачи принятия решений одновременно по нескольким критериям [24, 34, 39, 61]. Задача ставится следующим образом: требуется найти числа  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , удовлетворяющие системе ограничений:

$$g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (4.1)$$

для которых функции

$$z_k = f_k(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad k = 1, 2, \dots, K, \quad (4.2)$$

достигают максимального значения.

Множество точек  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , удовлетворяющих системе (4.1), образует допустимую область  $D \subset R^n$ . Элементы множества  $D$  называются допустимыми решениями или альтернативами, а числовые функции  $f_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$  – целевыми функциями, или критериями, заданными на множестве  $D$ . В формулировке задачи (4.1)-(4.2) присутствует  $K$  целевых функций. Эти функции отображают множество  $D \subset R^n$  в множество  $F \subset R^K$ , которое называется множеством достижимости [24, 39, 61].

В векторной форме математическую модель оптимизации (4.1)-(4.2) можно записать следующим образом:

$$\vec{f}(X) = (f_1(X), \dots, f_K(X)) \rightarrow \max \text{ при } X \in D. \quad (4.3)$$

Здесь  $\vec{f}(X)$  – вектор-функция аргумента  $X \in D$ .

В отличие от задач оптимизации с одним критерием в многокритериальной имеется неопределенность целей [24]. Действительно, существование решения, максимизирующего несколько целевых функций, является редким исключением. Поэтому с математической точки зрения задачи многокритериальной оптимизации являются неопределенными. Их следует рассматривать как компромиссное решение. Поэтому в работе поставлена задача получить оптимальные соотношения тока преобразователя и времени пуска для эффективной реализации передачи энергии подвижному объекту. Причем токовый критерий необходимо минимизировать, а время максимизировать [34].

Для получения функциональных зависимостей тока и напряжения тяговой сети, необходимых для решения оптимизационной задачи, применены методы регрессионного анализа.

С использованием метода наименьших квадратов получены коэффициенты уравнений регрессии 1-го, 2-го и 3-го порядков и построены соответствующие графики. На рисунках *Приложения В* показаны значения напряжения, полученные в результате вычислительного эксперимента, и уравнения линейной регрессии для значений  $I_{нач}$  соответственно 40А, 30А, 20А и 10А.

Из приведенных графиков видно, что линейная зависимость дает достаточно большие отклонения от расчетных точек для всех рассмотренных вариантов значений выходного тока тягового преобразователя частоты. Таким образом, можно сделать вывод о неприемлемости использования регрессии 1-го порядка.

Сравнение этих зависимостей показывает, что применение полинома 2-го порядка дает достаточно высокую степень приближения к исходным точкам для всех рассмотренных вариантов сочетания входных параметров ТПЧ. Целесообразность выбора нелинейной регрессии подтверждается и анализом соответствующих оценок дисперсий [34].

Однако аппроксимация полиномами второй и третьей степени при значениях аргумента  $t_{нач}$ , выходящих за пределы рассматриваемого диапазона 0,2...2 мс, искажает реальную картину изменения входного напряжения в силу особенностей протекающих в тяговой сети электромагнитных процессов. Поэтому целесообразно использовать для описания зависимостей входного напряжения тяговой сети от пусковых параметров ТПЧ экспоненциальную аппроксимацию (рис. 4.1).

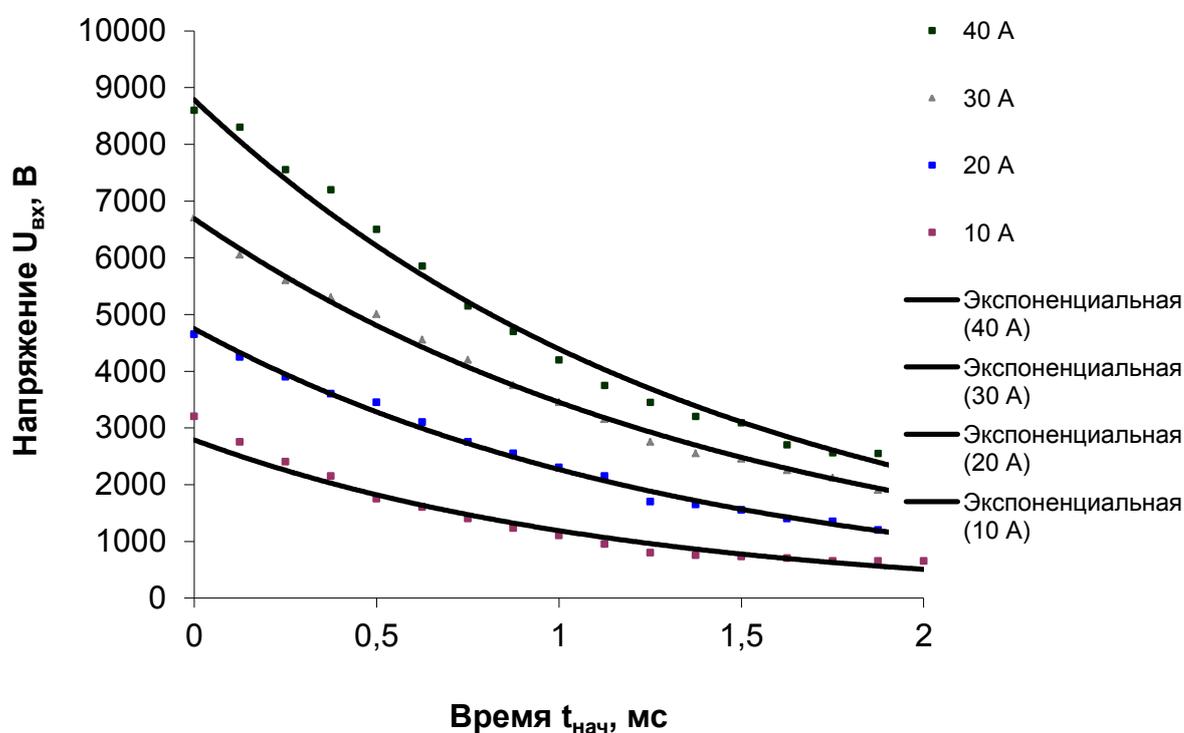


Рис. 4.1. Зависимости напряжения  $U_{вх}$  от времени  $t_{нач}$   
для  $I_{нач} = 40 \text{ А}, 30 \text{ А}, 20 \text{ А}$  и  $10 \text{ А}$

Для того, чтобы наиболее четко сформулировать задачу оптимизации пусковых параметров, проанализируем полученные зависимости для разных значений выходного тока  $I_{нач}$  и времени  $t_{нач}$  (рис. 4.2).

Анализ изменений параметров напряжения при пуске показывает, что пока тяговая сеть не заряжена и отсутствуют отраженные и преломленные волны

происходит нарастание ее входного напряжения, а затем по мере распространения энергии электромагнитных волн линия заряжается, уменьшается ее входное сопротивление и входное напряжение начинает снижаться. Такой характер процесса наблюдается при возрастании выходного тока преобразователя частоты до значения  $I_{нач}$  за 2 мс. При увеличении скорости нарастания тока ТПЧ (уменьшении значения  $t_{нач}$  до 0,2 мс) рост входного напряжения тяговой сети более резкий и происходит значительно быстрее, чем при меньшей скорости нарастания тока преобразователя. Объясняется это тем, что входной ток изменяется быстрее, чем происходит изменение входного сопротивления, обусловленное волновыми процессами в линии. Поэтому при возросших значениях тока значение входного сопротивления уменьшено еще незначительно, а входное напряжение, определяемое начальными условиями, достигает весьма больших значений.

Из предыдущих исследований [70] известно, что изменение напряжения носит более плавный характер после полного заряда линии, когда входное сопротивление достигает установившегося значения и изменение напряжения обусловлено только изменением входного тока. Скачкообразный рост входного напряжения происходит при резком увеличении выходного тока преобразователя частоты от нуля до  $I_{нач}$  за весьма короткий промежуток времени  $t_{нач}$ , равный 0,2 мс. С увеличением начального значения выходного тока ТПЧ при сохранении неизменным интервала его нарастания  $t_{нач}$  максимальные значения входного напряжения увеличиваются до 5,78 и 7,67 кВ для  $I_{нач}$  равного 30 и 40 А соответственно. При значениях  $I_{нач}$  10 и 20 А и времени  $t_{нач}$  - 0,2 мс наибольшие значения входного напряжения достигают соответственно 2,59 и 4,085 кВ. Увеличение интервала времени  $t_{нач}$  при неизменном значении  $I_{нач}$  приводит к снижению входного напряжения тяговой сети.

Появление на входе тяговой сети значительных перенапряжений влечет за собой увеличение поперечной составляющей напряжения на конденсаторах продольной компенсации. Возникновение таких напряжений приводит к

срабатыванию защиты преобразователя, что весьма нежелательно [79]. Поэтому требуется ограничение значений входного напряжения тяговой сети, которое достигается путем ограничения начального значения выходного тока преобразователя частоты и увеличения времени его нарастания. Входное напряжение тяговой сети не должно превышать значения 1650 В (амплитудное значение - 2120 В). Поэтому очевидно, что при пуске преобразователя частоты на тяговую сеть необходимо ограничивать начальную скорость нарастания выходного тока ТПЧ.

Математическая модель тяговой сети в пусковом режиме, полученная в виде совокупности разностных уравнений и краевых условий, позволяет выполнить математическое моделирование переходных процессов в сети при следующих начальных условиях:

- варьирование значений выходного тока тягового преобразователя частоты путем изменения граничных условий;
- варьирование значений интервала времени, в течение которого происходит увеличение выходного тока тягового преобразователя частоты в начальный период пуска, что обеспечивается алгоритмом расчета.

Вывод об ограничении начальной скорости возрастания выходного тока ТПЧ, сделанный по результатам исследования параметров пускового режима тяговой сети, обуславливает необходимость решения задачи оптимизации скорости изменения выходного тока ТПЧ в начальном периоде пуска на тяговую сеть.

*Постановка задачи оптимизации и определение оптимальных пусковых параметров тяговой сети.*

В начальный период пуска амплитуда выходного тока ТПЧ изменяется по линейному закону:

$$I_0 = \frac{I_{нач}}{t_{нач}} \cdot t \quad (4.4)$$

Скорость изменения выходного тока будет равна первой производной по времени:

$$\frac{dI_0}{dt} = \frac{I_{нач}}{t_{нач}}. \quad (4.5)$$

Оптимум будет определен, исходя из условия минимизации скорости возрастания выходного тока, в виде:

$$\frac{I_{нач}}{t_{нач}} \rightarrow \min. \quad (4.6)$$

Оптимизационная задача имеет ряд ограничений, обусловленных допустимыми по условиям надежности и безопасности значениям входного напряжения тяговой сети и диапазонами изменения значений временного интервала начального периода пуска, а также значений тока  $I_{нач}$ .

Таким образом, с учетом граничного условия, в соответствии с которым напряжение в начале тяговой сети изменяется по синусоидальному закону [34], первое ограничение имеет вид:

$$z_{ex} \cdot I_{нач} \cdot \sin \omega \cdot t_{нач} \leq u_{дон}. \quad (4.7)$$

Входное сопротивление в начальный период пуска постоянно и равно волновому (для рассматриваемой тяговой сети 300 Ом). Угловая частота  $\omega=2\pi f$  при частоте  $f=5000$  Гц будет равна  $31400 \text{ с}^{-1}$ . Допустимое напряжение определяется уставкой срабатывания защиты ТПЧ и равно 2120 В. Тогда первое ограничение запишется:

$$300 \cdot I_{нач} \cdot \sin 31400 \cdot t_{нач} \leq 2120 \text{ В}. \quad (4.8)$$

Остальные ограничения имеют вид:

$$\begin{aligned} t_{нач} &\leq 2\text{мс}; \\ t_{нач} &\geq 0,2\text{мс}; \\ I_{нач} &\leq 40\text{А}; \\ I_{нач} &\geq 10\text{А}. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Так как критерий  $\frac{I_{нач}}{t_{нач}} \rightarrow \min$  соблюдается при  $I_{нач} \rightarrow \min$  и  $t_{нач} \rightarrow \max$ , то формируется задача многокритериальной оптимизации, которая в окончательном виде будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} I_{нач} &\rightarrow \min; \\ t_{нач} &\rightarrow \max; \\ \left\{ \begin{array}{l} 300 \cdot I_{нач} \cdot \sin 31400 \cdot t_{нач} \leq 2120\text{В}; \\ t_{нач} \leq 2\text{мс}; \\ t_{нач} \geq 0,2\text{мс}; \\ I_{нач} \leq 40\text{А}; \\ I_{нач} \geq 10\text{А}. \end{array} \right. & \quad (4.10) \end{aligned}$$

Таким образом, сформулирована многокритериальная оптимизационная задача пускового режима ТПЧ. При этом определены начальные граничные условия пускового тока и времени его нарастания. Токвый критерий полагаем главным, поэтому он имеет приоритет при оптимизации.

## 4.2 Оптимизация пускового режима тяговой сети

Существуют различные методы решения задач многокритериальной оптимизации [24, 39, 61]. Рассмотрим варианты решения оптимизационной задачи различными математическими методами, основываясь на специфику протекания электромагнитных процессов в высокочастотных сетях повышенной частоты с неоднородностями.

*Метод последовательной уступки.*

Исходя из особенностей постановки данной задачи многокритериальной оптимизации наиболее приемлемым для решения составляющих ее двух однокритериальных задач является метод проекции градиента.

Суть метода проекции градиента состоит в следующем. Если имеется задача оптимизации вида:

$$\begin{aligned} f(x) &\rightarrow \min \\ x &\in X \subset R^n \\ f(x) &\in C'(R^n) \end{aligned} \quad (4.11)$$

то проекцией точки  $x$  на множество  $X$  называется точка  $u \in X$ , лежащая на кратчайшем расстоянии от  $x$ , то есть:  $u \in X : \|x - u\| \rightarrow \min_{u \in X}$ ,

где  $u=x$ , если  $x \in X$   $u=P_X(x)$ .

Для существования  $u$  множество  $X$  должно быть замкнутым.

Для того, чтобы  $P_X(x)$  была единственной, необходимо, чтобы множество  $X$  было выпуклым. Выбирается начальная точка  $x^0$  (необязательно принадлежащая  $X$ ). Затем выполняется некоторый шаг с целью приблизить решение к оптимуму:

$$x^{k+1} = P_x(x^k - \alpha_k \cdot f'(x^k)), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (4.12)$$

где  $\alpha_k \geq 0$  шаговый множитель, который выбирается аналогично другим градиентным методам.

Критерий окончания процесса оптимизации состоит в выполнении условия:

$$\begin{aligned} \|x^{k+1} - x^k\| &< \varepsilon \\ |f(x^{k+1}) - f(x^k)| &< \varepsilon, \end{aligned} \quad (4.13)$$

где  $\varepsilon$  – заранее заданное малое положительное число.

При реализации метода проекции градиента на каждой итерации приходится решать еще одну задачу оптимизации:

$$\|x - u\| \rightarrow \min_{u \in X}.$$

Поэтому этот метод применяется для решения тех задач, в которых множество  $X$  представляет собой множество простой структуры, и формулы проекции точки на множество можно получить в аналитическом виде.

Для  $X$ , представляющего собой  $n$ -мерный параллелепипед, справедливо:

$$X = \{x \in R^n : a_j \leq x_j \leq b_j, j = \overline{1, n}\},$$

если  $u = (u_1, u_2, \dots, u_n) = P_X(x)$ ,

$$u_j = \begin{cases} a_j, & x_j < a_j \\ x_j, & a_j \leq x_j \leq b_j \\ b_j, & x_j > b_j. \end{cases} \quad (4.14)$$

Пусть  $f_1 > f_2$ . Тогда применительно к поставленной задаче оптимизации имеем:

$$\begin{aligned} f_1 = I_{нач} &\rightarrow \min \\ \begin{cases} 300 \cdot I_{нач} \cdot \sin 31400 \cdot t_{нач} \leq 2120B \\ t_{нач} \leq 2мс \\ t_{нач} \geq 0,2мс \\ I_{нач} \leq 40A \\ I_{нач} \geq 10A \end{cases} &, \end{aligned} \quad (4.15)$$

Поскольку первое ограничение решаемой задачи оптимизации нелинейно, то для его учета введем штрафную функцию:

$$G_{r_k}(I_{нач}, t_{нач}) = I_{нач} + r_k \max^2((300 \cdot I_{нач} \cdot \sin 314 \cdot t_{нач} - 2120); 0), \quad (4.16)$$

где  $r_k \gg 0, r_k = 10^{15}$ .

Обозначим множество, для которого находят оптимальное решение, через  $U$ :

$$U \begin{cases} 0,2 \leq t_{нач} \leq 2 \\ 10 \leq I_{нач} \leq 40. \end{cases} \quad (4.17)$$

В качестве начального приближения принимаем:

$$u^0 = (5, 4);$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial G}{\partial I} &= \begin{cases} 1, t_{нач}^0, I_{нач}^0 \\ 1 + 2 \cdot r_k \cdot 300 \cdot \sin 31400 \cdot t_{нач}^0 \cdot (300 \cdot I \cdot \sin 31400 \cdot t - 2120); \end{cases} \\ \frac{\partial G}{\partial t} &= \begin{cases} 1, t_{нач}^0, I_{нач}^0 \\ 1 + 2 \cdot r_k \cdot 300 \cdot \sin 31400 \cdot t_{нач}^0 \cdot (300 \cdot I \cdot \sin 31400 \cdot t - 2120). \end{cases} \end{aligned} \quad (4.18)$$

Так как данное начальное приближение удовлетворяет первому ограничению, то справедливо:

$$\begin{aligned} \frac{\partial G}{\partial I} &= 1; & \alpha_k &= \frac{1}{1+k} = \frac{1}{1+0} = 1; \\ \frac{\partial G}{\partial t} &= I. & t_{нач}^1 &= P_U (5 - 1 \cdot 4) = 1; \\ & & I_{нач}^1 &= P_U (4 - 1 \cdot 1) = 10; \\ & & u^1 &= (1; 10). \end{aligned} \quad (4.19)$$

Это приближение также удовлетворяет первому ограничению, поэтому

$$\begin{aligned}
\frac{\partial G}{\partial I} &= 1; & \alpha_k &= \frac{1}{1+k} = \frac{1}{1+1} = \frac{1}{2}; \\
\frac{\partial G}{\partial t} &= I. & t_{нач}^2 &= P_U \left(1 - \frac{1}{2} \cdot 10\right) = 0,2; \\
& & I_{нач}^2 &= P_U \left(10 - \frac{1}{2} \cdot 1\right) = 10; \\
& & u^2 &= (0,2;10).
\end{aligned} \tag{4.20}$$

Так как данное приближение удовлетворяет первому ограничению, то

$$\begin{aligned}
\frac{\partial G}{\partial I} &= 1; & \alpha_k &= \frac{1}{1+k} = \frac{1}{1+2} = \frac{1}{3}; \\
\frac{\partial G}{\partial t} &= I. & t_{нач}^3 &= P_U \left(0,2 - \frac{1}{3} \cdot 10\right) = 0,2; \\
& & I_{нач}^3 &= P_U \left(10 - \frac{1}{3} \cdot 1\right) = 10; \\
& & u^3 &= (0,2;10).
\end{aligned} \tag{4.21}$$

Следовательно, оптимальные значения критериев:

$$\begin{aligned}
I_{нач} &= 10 \text{ A}; \\
t_{нач} &= 0,2 \text{ мс}.
\end{aligned}$$

Проведем оптимизацию по критерию  $f_2$ .

Пусть  $\varepsilon_1 = 0.5$ , тогда однокритериальная задача будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
& f_2 = t_{нач} \rightarrow \max; \\
& \left\{ \begin{array}{l} 300 \cdot I_{нач} \cdot \sin 31400 \cdot t_{нач} \leq 2120 \text{ B}; \\ t_{нач} \leq 2 \text{ мс}; \\ t_{нач} \geq 0,2 \text{ мс}; \\ I_{нач} \leq 40 \text{ A}; \\ I_{нач} \geq 10,5 \text{ A}. \end{array} \right. ,
\end{aligned} \tag{4.22}$$

Аналогично первой задаче вводим штрафную функцию:

$$G_{r_k}(I_{нач}, t_{нач}) = t_{нач} + r_k \max^2((300 \cdot I_{нач} \cdot \sin 31400 \cdot t_{нач} - 2120); 0), \quad (4.23)$$

где  $r_k \gg 0, r_k = 10^{15}$

Находим решение на множестве  $U$ :

$$U \begin{cases} 0,2 \leq t_{нач} \leq 2 \text{ (мс)} \\ 10,5 \leq I_{нач} \leq 40 \text{ (А)}. \end{cases} \quad (4.24)$$

В качестве начального приближения принимаем:

$$u^0 = (5,4);$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial G}{\partial I} &= \begin{cases} 1, t_{нач}^0, I_{нач}^0 \\ 1 + 2 \cdot r_k \cdot 300 \cdot \sin 31400 \cdot t_{нач}^0 \cdot (300 \cdot I \cdot \sin 31400 \cdot t - 2120) \end{cases}; \\ \frac{\partial G}{\partial t} &= \begin{cases} 1, t_{нач}^0, I_{нач}^0 \\ 1 + 2 \cdot r_k \cdot 300 \cdot \sin 31400 \cdot t_{нач}^0 \cdot (300 \cdot I \cdot \sin 31400 \cdot t - 2120) \end{cases}. \end{aligned} \quad (4.25)$$

Так как данное начальное приближение удовлетворяет первому ограничению, то

$$\begin{aligned} \frac{\partial G}{\partial I} &= 1; & \alpha_k &= \frac{1}{1+k} = \frac{1}{1+0} = 1; \\ \frac{\partial G}{\partial t} &= I. & t_{нач}^1 &= P_U(5 + 1 \cdot 1) = 2; \\ & & I_{нач}^1 &= P_U(4 + 1 \cdot 5) = 10.5; \\ & & u^1 &= (2; 10.5). \end{aligned} \quad (4.26)$$

Результаты последующих итераций сводим в таблицу 4.1.

Табл. 4.1

Значения оптимизируемых параметров

№ итерации	$t_{нач}$ , мс	$I_{нач}$ , А	№ итерации	$t_{нач}$ , мс	$I_{нач}$ , А
0	5	4	24	2	16,05192
1	2	10,5	25	2	16,13192
2	2	11,5	26	2	16,20884
3	2	12,16667	27	2	16,28291
4	2	12,66667	28	2	16,35434
5	2	13,06667	29	2	16,42331
6	2	13,4	31	2	16,55449
7	2	13,43571	32	2	16,61699
8	2	13,68571	33	2	16,6776
9	2	14,15794	34	2	16,73642
10	2	14,35794	35	2	16,79356
11	2	14,53975	36	2	16,84912
12	2	14,70642	37	2	16,87615
13	2	14,86027	38	2	16,90246
14	2	15,00312	39	2	16,9281
15	2	15,13646	40	2	16,9531
16	2	15,26146	41	2	16,97749
17	2	15,37911	42	2	17,0013
18	2	15,49022	43	2	17,02456
19	2	15,59548	44	2	17,04729
20	2	15,69548	45	2	17,06951
21	2	15,79072	46	2	17,09125
22	2	15,88163	47	2	17,11252
23	2	15,96858	48	2	17,13336

№ итерации	$t_{нач}$ , мс	$I_{нач}$ , А	№ итерации	$t_{нач}$ , мс	$I_{нач}$ , А
49	2	17,15376	83	2	17,67663
50	2	17,17376	84	2	17,68853
51	2	17,19337	85	2	17,7003
52	2	17,2126	86	2	17,71192
53	2	17,23147	87	2	17,72342
54	2	17,24999	88	2	17,73478
55	2	17,26817	90	2	17,75713
56	2	17,28603	91	2	17,76812
57	2	17,30357	92	2	17,77899
58	2	17,32081	93	2	17,78974
59	2	17,33776	94	2	17,80038
60	2	17,35443	95	2	17,81091
61	2	17,37082	96	2	17,82132
62	2	17,38695	97	2	17,83163
63	2	17,40283	98	2	17,84184
64	2	17,41845	99	2	17,85194
65	2	17,43383	100	2	17,86194
66	2	17,44899	101	2	17,87184
67	2	16,96391	102	2	17,88164
68	2	17,47862	103	2	17,89135
69	2	17,49311	104	2	17,90097
70	2	17,5074	105	2	17,91049
71	2	17,52148	106	2	17,91992
72	2	17,53537	107	2	17,92927
73	2	17,54907	108	2	17,93853
74	2	17,56258	109	2	17,9477
75	2	17,57591	110	2	17,95679
76	2	17,58907	111	2	17,9658
77	2	17,60206	112	2	17,97473
78	2	17,61488	113	2	17,98358
79	2	17,62754	114	2	17,99235
80	2	17,64004	115	2	18,00105
81	2	17,65238	116	2	18,00967
82	2	17,66458			

Таким образом, оптимальными значениями  $t_{нач}$  и  $I_{нач}$  являются соответственно 2 мс и 18,009 А.

Недостатком данного метода оптимизации является трудоемкость математических операций, а также результат оптимизации по времени не обеспечил минимизации токового критерия.

### Метод главного критерия

Этот метод предполагает, что критерии упорядочены по важности. Он состоит в выборе наиболее важного критерия, по которому будет проводиться оптимизация, а на остальные критерии накладываются ограничения. То есть, имеется многокритериальная задача оптимизации:

$$\begin{aligned} f_i(x) &\rightarrow \max, i \in I_1; \\ f_i(x) &\rightarrow \max, i \in I_2, \end{aligned} \quad (4.27)$$

в которой критерии упорядочены по важности:

$$\begin{aligned} f_1 &> f_2 > \dots > f_n; \\ x &\in X. \end{aligned}$$

Проводится оптимизация по наиболее важному критерию:

$$\begin{aligned} f_1 &\rightarrow opt \\ x &\in X \\ f_i(x) &\geq b_i, \quad i \in I_1, \quad i \neq 1 \\ f_i(x) &\geq b_i, \quad i \in I_2 \end{aligned} \quad (4.28)$$

Постановка научной задачи предполагает - приоритетным направлением при разработке энергоэффективных режимов является энергосбережение. Поэтому токовый критерий  $f_1$  - главный. При этом оптимизационная задача имеет вид:

$$\begin{cases} 300 \cdot I_{нач} \cdot \sin 31400 \cdot t_{нач} \leq 2120 B; \\ t_{нач} \leq 2 мс; \\ t_{нач} \geq 0,2 мс; \\ I_{нач} \leq 40 A; \\ I_{нач} \geq 10 A. \end{cases} \quad (4.29)$$

Так же, как и в методе последовательной уступки, введем штрафную функцию:

$$G_{r_k}(I_{нач}, t_{нач}) = I_{нач} + r_k \max^2((300 \cdot I_{нач} \cdot \sin 31400 \cdot t_{нач} - 2120); 0)$$

$$r_k \gg 0, r_k = 10^{15}.$$

Обозначим множество, для которого находят оптимальное решение, через  $U$ :

$$U \begin{cases} 0,2 \leq t_{нач} \leq 2 \text{ (мс)} \\ 10,5 \leq I_{нач} \leq 40 \text{ (А)}. \end{cases}$$

В качестве начального приближения принимаем:

$$u^0 = (5,4)$$

$$\frac{\partial G}{\partial I} = \begin{cases} 1, t_{нач}^0, I_{нач}^0 \\ 1 + 2 \cdot r_k \cdot 300 \cdot \sin 31400 \cdot t_{нач}^0 \cdot (300 \cdot I \cdot \sin 31400 \cdot t - 2120) \end{cases};$$

$$\frac{\partial G}{\partial t} = \begin{cases} I, t_{нач}^0, I_{нач}^0 \\ I + 2 \cdot r_k \cdot 300 \cdot \sin 31400 \cdot t_{нач}^0 \cdot (300 \cdot I \cdot \sin 31400 \cdot t - 2120) \end{cases} \quad (4.30)$$

Так как данное начальное приближение удовлетворяет первому ограничению, то

$$\begin{aligned} \frac{\partial G}{\partial I} &= 1; & \alpha_k &= \frac{1}{1+k} = \frac{1}{1+0} = 1; \\ \frac{\partial G}{\partial t} &= I. & t_{нач}^1 &= P_U(5 - 1 \cdot 4) = 1; \\ & & I_{нач}^1 &= P_U(4 - 1 \cdot 1) = 10; \\ & & u^1 &= (1; 10). \end{aligned} \quad (4.31)$$

Данное приближение также удовлетворяет первому ограничению, следовательно

$$\begin{aligned}
\frac{\partial G}{\partial I} &= 1; & \alpha_k &= \frac{1}{1+k} = \frac{1}{1+1} = \frac{1}{2}; \\
\frac{\partial G}{\partial t} &= I. & t_{нач}^2 &= P_U \left(1 - \frac{1}{2} \cdot 10\right) = 0,2; \\
& & I_{нач}^2 &= P_U \left(10 - \frac{1}{2} \cdot 1\right) = 10; \\
& & u^2 &= (0,2;10).
\end{aligned} \tag{4.32}$$

Далее

$$\begin{aligned}
\frac{\partial G}{\partial I} &= 1; & \alpha_k &= \frac{1}{1+k} = \frac{1}{1+2} = \frac{1}{3}; \\
\frac{\partial G}{\partial t} &= I. & t_{нач}^3 &= P_U \left(0,2 - \frac{1}{3} \cdot 10\right) = 0,2; \\
& & I_{нач}^3 &= P_U \left(10 - \frac{1}{3} \cdot 1\right) = 10; \\
& & u^3 &= (0,2;10).
\end{aligned} \tag{4.33}$$

Следовательно, оптимальные значения критериев:

$$\begin{aligned}
I_{нач} &= 10 \text{ A}; \\
t_{нач} &= 0,2 \text{ мс}.
\end{aligned}$$

Применяя ранжирование критериев оптимизации данный метод не обеспечил оптимальное значение по времени нарастания тока, поэтому данный метод находит ограниченное применение при поиске оптимальных энергоэффективных показателей.

### *Метод свертки*

Общая структура метода свертки имеет вид:

- критерии приводятся к сопоставимому, безразмерному виду;

- локальные критерии сворачиваются в один общий критерий, учитывая их важность;
- решается полученная однокритериальная задача.

Виды сверток:

- 1)  $F(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot f_i(x)$ ;
- 2)  $F(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot f_i^k(x)$ ;
- 3)  $F(x) = \prod_{i=1}^n f_i^{\alpha_i}(x)$ ;
- 4)  $F(x) = (\sum_{i \in \epsilon_2} f_i(x)) / \sum_{i \in \epsilon_2} f_i(x)$ ;
- 5)  $F(x) = \max_i f_i(x)$ .

Так как данный метод предполагает сворачивание локальных критериев в один общий, то необходимо привести их к сопоставимому виду. Для этого проведем нормализацию критериев. Два наиболее распространенных способа нормализации имеют вид:

$$\omega_i^1(f_i) = \begin{cases} \frac{f_i^{opt} - f_i}{f_i^{opt} - f^{\min}}, & i \in I_1 \\ \frac{f_i - f_i^{opt}}{f_i^{\max} - f_i^{opt}}, & i \in I_2 \end{cases}$$

$$\omega_i^2(f_i) = \begin{cases} \frac{f_i^{opt} - f_i}{f_i^{opt}}, & i \in I_1 \\ \frac{f_i - f_i^{opt}}{f_i^{opt}}, & i \in I_2 \end{cases}$$

Воспользовавшись первым способом, получим:

$$f_1 = \frac{1}{30} \cdot I_{нач} - \frac{1}{3} \rightarrow \min;$$

$$f_2 = \frac{10}{9} - \frac{5}{9} \cdot t_{нач} \rightarrow \max;$$

$$\begin{cases} 300 \cdot I_{нач} \cdot \sin 31400 \cdot t_{нач} \leq 2120 \text{ В}; \\ t_{нач} \leq 2 \text{ мс}; \\ t_{нач} \geq 0,2 \text{ мс}; \\ I_{нач} \leq 40 \text{ А}; \\ I_{нач} \geq 10 \text{ А}. \end{cases}$$

Пусть значимость критерия  $f_1 - \alpha_1 = 0,6$ , а значимость критерия  $f_2 - \alpha_2 = 0,4$ .

Поменяем знаки в критерии  $f_1$ , чтобы обобщенный критерий можно было максимизировать. Воспользовавшись первым типом свертки, получим следующую задачу:

$$F(I_{нач}, t_{нач}) = \frac{29}{45} - \frac{3}{20} \cdot I_{нач} - \frac{2}{9} \cdot t_{нач} \rightarrow \max;$$

$$\begin{cases} 300 \cdot I_{нач} \cdot \sin 31400 \cdot t_{нач} \leq 2120 \text{ В}; \\ t_{нач} \leq 2 \text{ мс}; \\ t_{нач} \geq 0,2 \text{ мс}; \\ I_{нач} \leq 40 \text{ А}; \\ I_{нач} \geq 10 \text{ А}. \end{cases}$$

Аналогично предыдущим двум методам введем штрафную функцию:

$$G_{r_k}(I_{нач}, t_{нач}) = \frac{29}{45} - \frac{3}{20} \cdot I_{нач} - \frac{2}{9} \cdot t_{нач} + r_k \max^2((300 \cdot I_{нач} \cdot \sin 31400 \cdot t_{нач} - 2120); 0)$$

$$r_k \gg 0, r_k = 10^{15}$$

Обозначим множество, на котором ищется оптимальное решение, через  $U$ :

$$U \begin{cases} 0,2 \leq t_{нач} \leq 2 \text{ (мс)} \\ 10,5 \leq I_{нач} \leq 40 \text{ (А)}. \end{cases}$$

В качестве начального приближения принимаем:

$$u^0 = (5,4)$$

$$\frac{\partial G}{\partial I} = \begin{cases} \frac{89}{180} - \frac{2}{9} \cdot t_{нач}^0, t_{нач}^0, I_{нач}^0 \\ \frac{89}{180} - \frac{2}{9} \cdot t_{нач} + 2 \cdot r_k \cdot 300 \cdot \sin 31400 \cdot t_{нач}^0 \cdot (300 \cdot I \cdot \sin 31400 \cdot t - 2120) \end{cases}$$

$$\frac{\partial G}{\partial I} = \begin{cases} \frac{19}{45} - \frac{3}{20} \cdot I_{нач}^0, t_{нач}^0, I_{нач}^0 \\ \frac{19}{45} - \frac{3}{20} \cdot I_{нач} + 2 \cdot r_k \cdot 300 \cdot \sin 31400 \cdot t_{нач}^0 \cdot (300 \cdot I \cdot \sin 31400 \cdot t - 2120) \end{cases}$$

Так как данное начальное приближение удовлетворяет первому ограничению, то

$$\frac{\partial G}{\partial I} = \frac{89}{180} - \frac{2}{9} \cdot t_{нач};$$

$$\frac{\partial G}{\partial t} = \frac{19}{45} - \frac{3}{20} \cdot I_{нач}.$$

$$\alpha_k = \frac{1}{1+k} = \frac{1}{1+0} = 1;$$

$$t_{нач}^1 = P_U (5 + 1 \cdot (\frac{19}{45} - \frac{3}{20} \cdot 4)) = 2;$$

$$I_{нач}^1 = P_U (4 + 1 \cdot (\frac{89}{180} - \frac{2}{9} \cdot 5)) = 10;$$

$$u^1 = (2; 10).$$

Это приближение также удовлетворяет первому ограничению, поэтому

$$\frac{\partial G}{\partial I} = \frac{89}{180} - \frac{2}{9} \cdot t_{нач};$$

$$\frac{\partial G}{\partial t} = \frac{19}{45} - \frac{3}{20} \cdot I_{нач}.$$



последовательной уступки – 2 мс и 18,009 А и по результатам применения метода свертки – 1,401 мс и 10,228 А.

Использование полученных результатов при реализации пуска ТПЧ на тяговую сеть позволит снизить затраты на добычу угля за счет снижения издержек на потребляемую электроэнергию, сократить затраты на ремонт и замену оборудования, а также продлить срок службы оборудования.

### **4.3 Зависимости потерь мощности в тяговой сети при пуске**

Главными достоинствами транспорта с бесконтактным токосъемом являются искробезопасность, а также надежность, безопасность обслуживания и высокие энергетические показатели. Однако эксплуатация опытных образцов бесконтактных электровозов показала, что нередко возникают сбои в работе транспорта и, как следствие, снижается его энергоэффективность [53, 55, 77]. Эти сбои связаны, в частности, со срабатыванием защиты преобразователя, которые происходят из-за появления в тяговой сети перенапряжений. Статистические данные свидетельствуют, что подобные явления наблюдаются в большей степени при пуске ТПЧ на тяговую сеть. Ухудшение энергетических показателей при пуске необязательно следует только из срабатывания защиты. Так, выход из строя одного или нескольких компенсирующих конденсаторов тяговой сети приводит к увеличению реактивного сопротивления сети, а, следовательно, и потерь напряжения и мощности в ней.

В исследованиях, проведенных ранее [64], отмечается, что наибольшие потери мощности имеют место именно в тяговой сети, так как специфика работы транспорта требует постоянного поддержания тока в тяговой сети на уровне 150 А. Такие условия приводят к тому, что независимо от того, работают электровозы или нет, потери мощности достаточно значительные. Тем не менее оценка этих параметров дает возможность определить пути снижения потерь мощности в тяговой сети за счет регулирования, в частности, пусковых процессов в преобразователе частоты. Поэтому особый интерес

представляют потери мощности при пуске тягового преобразователя частоты на тяговую сеть.

Пусковой процесс ранее рассматривался в двух аспектах:

- процессы непосредственно в ТПЧ;
- влияние пусковых параметров преобразователя на входные параметры тяговой сети.

Такой подход позволил рассчитать параметры режима системы «ТПЧ-тяговая сеть» в пусковом процессе, обеспечивающие плавный переход тяговой сети в установившийся режим [34, 73, 74]. Проведенная на основе этих расчетов корректировка алгоритма пуска ТПЧ позволила избежать перенапряжений в тяговой сети, приводящих к выходу из строя конденсаторов продольной емкостной компенсации, однако полученное решение находит ограниченное применение, поскольку соответствует тяговой сети длиной 1 км [70].

К тому же считать такой алгоритм оптимальным с точки зрения энергопотребления было бы бездоказательным, поскольку полученные результаты не оценивались на предмет таких энергетических показателей, как потери мощности. Приведенные в работе зависимости описывают область ограничений входных параметров тяговой сети при пуске. Задачей данного исследования является уточнение этой области на основании анализа потерь мощности, которые имеют место при разных вариантах сочетания параметров пускового режима. Решение такой задачи связано с определенными сложностями. Эти сложности обусловлены особенностями тяговой сети, состоящими, в первую очередь, в распределенности ее параметров, а также в наличии большого числа конденсаторов продольной компенсации.

Мощность потерь в тяговой сети определяется выражением:

$$\Delta P = I^2 r_0 l, \quad (4.34)$$

где  $I$  – действующее значение тока в тяговой сети;

$r_0$  – удельное активное сопротивление потерь в тяговой сети;

$l$  – длина линии.

При пуске ток в сечениях тяговой сети неодинаков (вследствие проявления ее волновых свойств). Поэтому потери мощности при этом необходимо определять, исходя из распределенности параметров сети [48]:

$$\Delta P = r_0 \int_0^l (I(x))^2 dx. \quad (4.35)$$

Сложность использования последнего выражения для тяговой сети заключается в невозможности получить аналитическую зависимость тока от координаты сечения тяговой сети. Измерить значения тока в сечениях реальной тяговой сети также весьма затруднительно. Поэтому допустимо воспользоваться результатами вычислительного эксперимента, полученными на математической модели. Из теории планирования эксперимента [61] известно: результаты измерений могут рассматриваться как случайные величины, зависимости между которыми возможно получить, используя регрессионный анализ.

#### *Анализ методов построения регрессионных зависимостей*

Известно, что регрессионный анализ – это метод статистического анализа зависимости случайной величины  $y$  от переменных  $x_j$  ( $j=1, 2, \dots, k$ ).

В регрессионном анализе рассматривается связь между одной переменной, которая называется зависимой переменной или признаком и несколькими другими, которые называются независимыми переменными.

Эта связь представляется с помощью математической модели, то есть, уравнением, которое связывает зависимую переменную ( $y$ ) с независимыми ( $x$ ) с учетом множества соответствующих предположений.

Поскольку целью регрессионного анализа есть выявление влияния переменных  $x$  на значение переменной  $y$ , последнюю еще называют

результативным фактором, а переменные  $x$  – факторами, которые влияют на результативный фактор.

Регрессионный анализ используют по двум причинам:

- описание зависимости между переменными помогает установить наличие возможной причинной связи;
- получение аналитической зависимости между переменными дает возможность предусматривать будущие значения зависимой переменной по значениям независимых переменных.

Обычно предполагается, что случайная величина  $y$  имеет нормальный закон распределения с условным математическим ожиданием  $\tilde{y}$ , являющимся функцией от аргументов  $x_j$  ( $j=1,2,\dots,k$ ) и постоянной, не зависящей от аргументов дисперсией  $\sigma^2$ .

В регрессионном анализе вид уравнения регрессии выбирают исходя из анализа физической сущности изучаемого явления и результатов наблюдения [27].

Наиболее часто встречаются следующие виды уравнений регрессии:

- собственно линейное многомерное:

$$\tilde{y} = \beta_0 + \beta_1 \tilde{x}_1 + \beta_2 \tilde{x}_2 + \dots + \beta_k x_k;$$

- полиномиальное:

$$\tilde{y} = \beta_0 + \beta_1 \tilde{x}_1 + \beta_2 \tilde{x}_2^2 + \dots + \beta_k x_k^k;$$

- гиперболическое:

$$\tilde{y} = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{x};$$

- степенное:

$$\tilde{y} = \beta_0' * x_1^{\beta_1} x_2^{\beta_2} \dots x_k^{\beta_k}.$$

Путем логарифмирования степенные уравнения регрессии могут быть преобразованы в линейные уравнения относительно параметров  $\beta_j$ .

Выбор формы связи затрудняется тем, что при использовании математического аппарата теоретически зависимость между признаками может быть выражена большим числом различных функций.

Выбор типа уравнения осложнен тем, что для любой формы зависимости выбирается целый ряд уравнений, которые в определенной степени будут описывать эти связи. Некоторые предпосылки для выбора определенного уравнения регрессии получают на основе анализа предшествующих аналогичных исследований или на базе анализа подобных работ в смежных отраслях знаний. Поскольку уравнение регрессии строится главным образом для объяснения и количественного выражения взаимосвязей, оно должно хорошо отражать сложившиеся между исследуемыми факторами фактические связи.

Наиболее приемлемым способом определения вида исходного уравнения регрессии является *метод перебора различных уравнений* [39]. Сущность данного метода заключается в том, что большое число уравнений (моделей) регрессии, отобранных для описания связей какого-либо явления или процесса, реализуется на ЭВМ с помощью специально разработанного алгоритма перебора с последующей статистической проверкой, главным образом на основе t-критерия Стьюдента и F-критерия Фишера. Способ перебора является достаточно трудоемким и его применение обосновано, в основном, при исследовании социально-экономических явлений. Поэтому для поставленной в работе задачи его применение нецелесообразно.

*Метод экспертных оценок* [39] используется как эвристический метод анализа основных макроэкономических показателей, формирующих единую международную систему расчетов, основан на интуитивно-логических предпосылках, содержательно-качественном анализе. Анализ экспертной информации проводится на базе расчета и анализа непараметрических показателей связи: ранговых коэффициентов корреляции Спирмена, Кендалла и конкордации. Данный метод неприменим для данного направления исследования.

Достаточно широко применяется *шаговый регрессионный анализ* [39]. Сущность метода шаговой регрессии заключается в последовательном включении факторов в уравнение регрессии и последующей проверке их значимости. Факторы поочередно вводятся в уравнение так называемым "прямым методом". При проверке значимости введенного фактора определяется насколько уменьшается сумма квадратов остатков и увеличивается значение множественного коэффициента корреляции. Одновременно используется и обратный метод, т.е. исключение факторов, ставших незначимыми на основе t-критерия Стьюдента. Фактор является незначимым, если его включение в уравнение регрессии только изменяет значение коэффициентов регрессии, не уменьшая суммы квадратов остатков и не увеличивая их значения. Если при включении в модель соответствующего факторного признака значение множественного коэффициента корреляции увеличивается, а коэффициент регрессии не изменяется (меняется несущественно), то данный признак существен и его включение в уравнение регрессии необходимо. Этот метод также является достаточно трудоемким и нецелесообразным в применении.

При решении задачи сглаживания экспериментальной зависимости в случае, когда вид зависимости  $y=f(x)$  до опыта известен, обычно применяется расчетный метод, известный под названием «метода наименьших квадратов» [27, 39].

#### *Моделирование параметров пускового режима*

Сущность метода наименьших квадратов при решении поставленной задачи заключается в следующем:

- Разбиваем время переходного процесса на несколько значений для каждого из которого получаем  $n$  значений тока  $i_1, i_2, \dots, i_n$ , соответствующих значениям  $x_1, x_2, \dots, x_n$  сечений тяговой линии.

Регрессионная зависимость  $i$  от  $x$  не может совпадать с экспериментальными значениями  $i_i$  во всех  $n$  точках. Это означает, что для всех или некоторых точек разность

$$\Delta_i = i_i - f(x_i) \quad (4.36)$$

будет отлична от нуля.

Требуется подобрать параметры функции таким образом, чтобы сумма квадратов разностей была наименьшей, т. е. требуется обратить в минимум выражение:

$$z = \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = \sum_{i=1}^n [i_i - f(x_i)]^2. \quad (4.37)$$

Таким образом, при методе наименьших квадратов приближение аналитической функции к экспериментальной зависимости считается наилучшим, если выполняется условие минимума суммы квадратов отклонений искомой аналитической функции от экспериментальной зависимости.

- Далее для различных начальных условий ( $I_{нач}$ ,  $t_{нач}$ ) получаем экспериментальные данные с помощью математической модели.
- Определяем коэффициенты линии регрессии и строим регрессионную зависимость таким образом, чтобы достоверность аппроксимации была наибольшей.
- Полученную зависимость  $I=f(x)$  используем для определения потерь мощности в тяговой линии в определенный момент времени по формуле (4.35).
- Строим зависимость потерь мощности от времени пускового процесса при различных выходных параметрах ТПЧ (рис.4.4-4.5).

Как следует из приведенных данных для нахождения функциональной зависимости тока от координаты сечения сети допустимо воспользоваться регрессионным анализом, в частности применим метод наименьших квадратов.

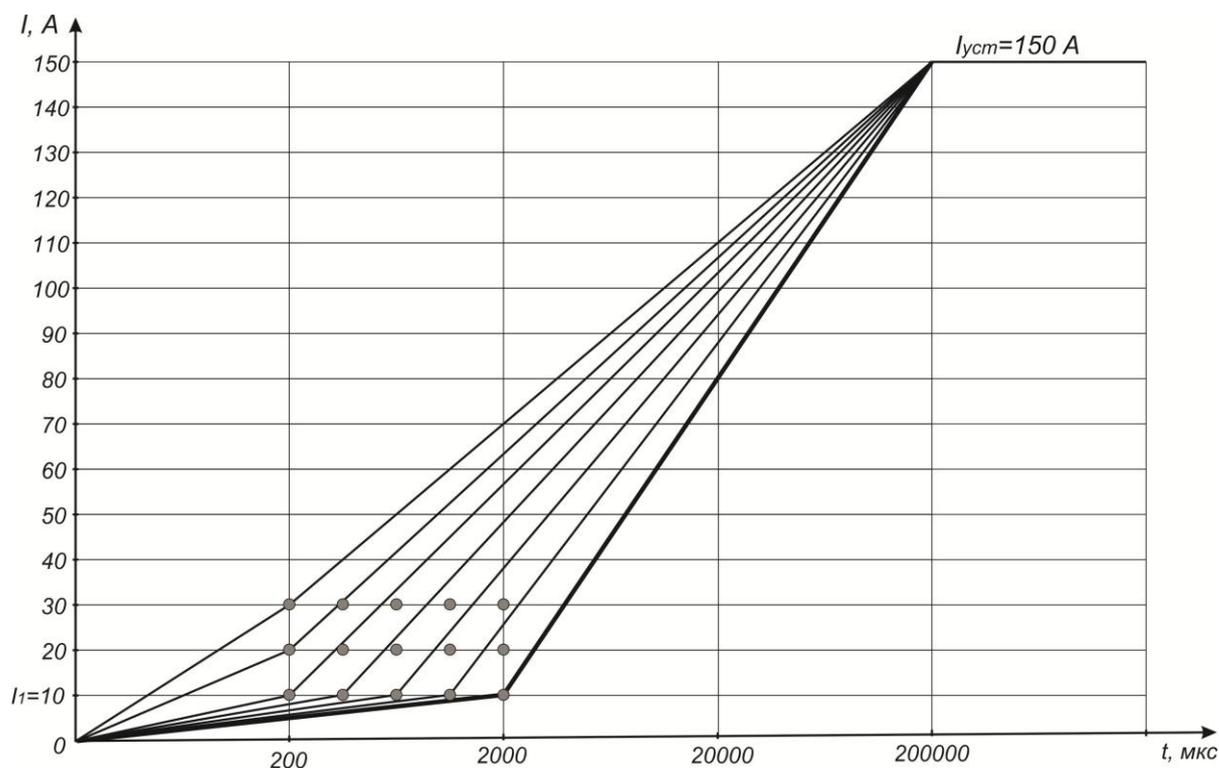


Рис. 4.2. Изменение выходного тока ТПЧ при пуске на ненагруженную тяговую сеть

Исходные массивы данных сформированы на основании известной зависимости изменения выходного тока ТПЧ (рис. 4.2), согласно которой последний плавно нарастает от нулевого значения до некоторого промежуточного (начального) значения, а затем до установившегося. Возрастание тока до начального значения происходит за интервал времени, который может изменяться в пределах 200...2000 мкс [34]. Дальнейшее нарастание выходного тока преобразователя частоты до установившегося значения рассматривается за время 200000 мкс [34], исходя из условий обеспечения нормальных режимов электрооборудования комплекса. Выходной ток ТПЧ является входным параметром для тяговой сети и, следовательно, влияет на ее параметры режима.

Алгоритм определения потерь мощности в тяговой сети при пусковом процессе с учетом изменения выходных параметров ТПЧ, обусловленных волновыми свойствами линии, приведен на рис. 4.3.

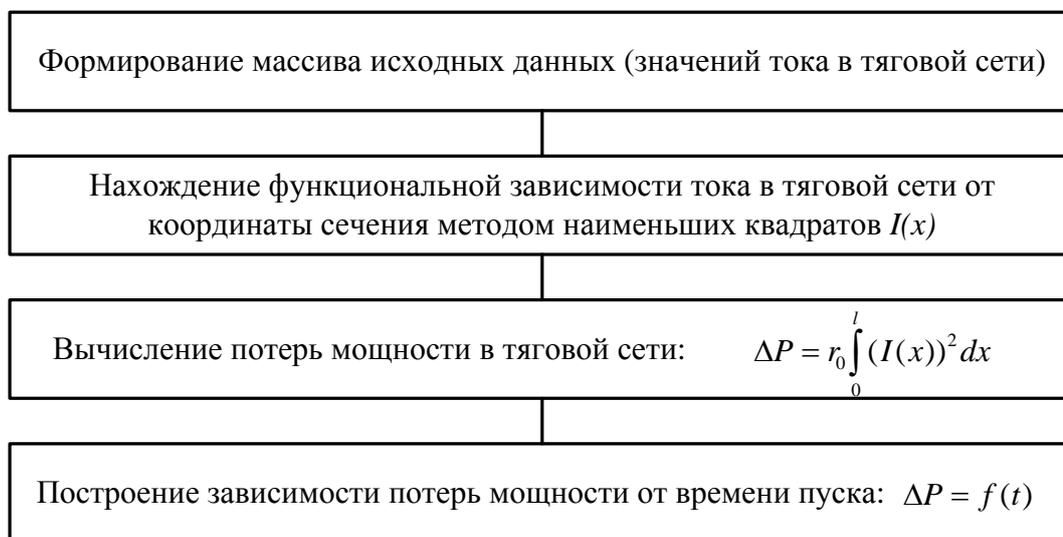


Рис. 4.3. Алгоритм определения уровней потерь в тяговой сети при пуске

Данная постановка задачи определения потерь позволила оценить влияние начального увеличения тока  $I_l$  при фиксированном значении времени его нарастания  $t_l$  на потери мощности в тяговой сети. Как видно, в любой момент пускового процесса потери мощности увеличиваются с увеличением начального тока до момента достижения током установившегося значения.

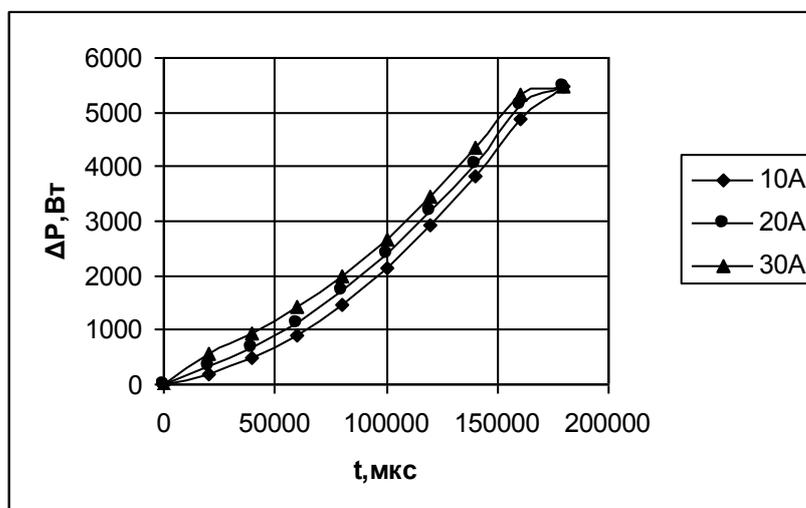
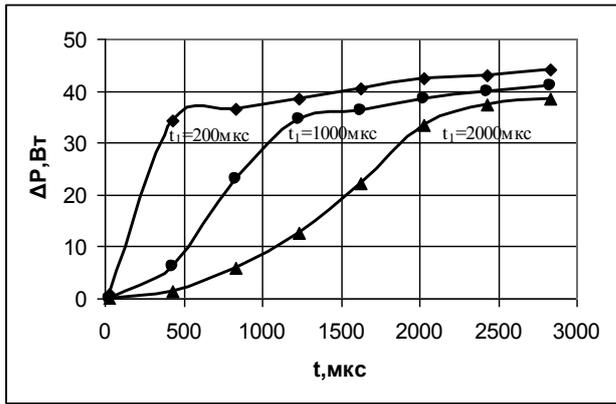
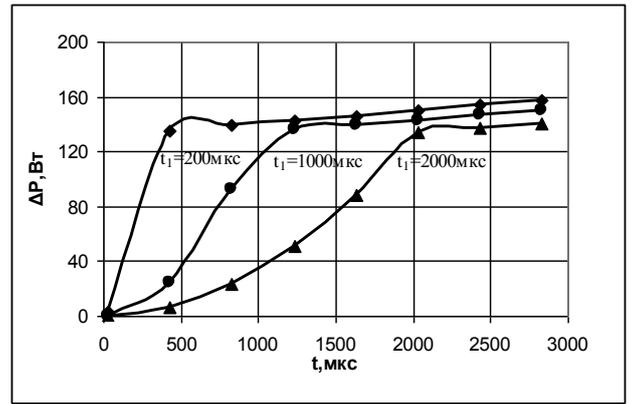


Рис. 4.4. Зависимости потерь мощности от начального нарастания тока ТПЧ и времени переходного процесса

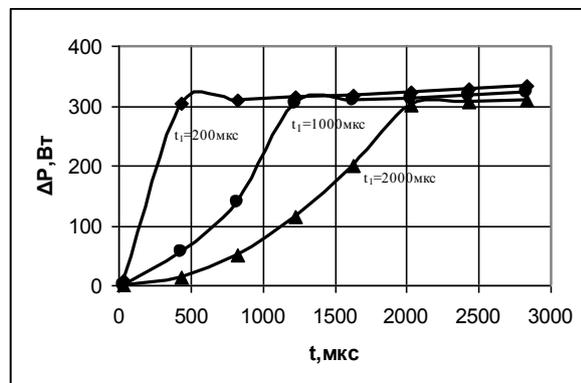
Влияние времени достижения начального значения тока ( $t_I=200, 1000, 2000$  мкс) на потери мощности при неизменном начальном увеличении выходного тока ТПЧ  $I_I$  иллюстрируют рис. 4.5 (а-в). Очевидно, что потери мощности увеличиваются при всех значениях времени начального нарастания тока. Для установленных вариантов  $t_I$ , равных соответственно 200, 1000 и 2000 мкс, наблюдается тенденция резкого увеличения потерь мощности непосредственно после перехода характеристики тока на более плавный участок. Таким образом, для одного и того же момента пускового процесса и неизменного  $I_I$  потери мощности могут изменяться в зависимости от начального времени увеличения тока  $t_I$ , причем потери тем больше, чем меньше значение  $t_I$ . При достижении током значения  $I_I$  в следующий промежуток пускового процесса потери мощности практически не изменяются. Эти графики свидетельствуют, что скачкообразное увеличение потерь мощности происходит при резком увеличении выходного тока преобразователя частоты от нуля до  $I_I$  за промежуток времени до 200 мкс. Увеличение интервала времени  $t_I$  при неизменном значении  $I_I$  приводит к снижению потерь мощности в тяговой сети.



а)



б)



в)

Рис. 4.5. Потери мощности в тяговой сети при пуске при изменении времени нарастания выходного тока ТПЧ для  $I_1=10\text{A}$  (а),  $I_1=20\text{A}$  (б),  $I_1=30\text{A}$  (в)

Такой характер семейства кривых потерь мощности объясняется волновыми свойствами линии, поскольку токи в сечениях тяговой сети при пуске ТПЧ зависят от характера изменения волнового сопротивления тяговой сети. Пока линия не заряжена, волновое сопротивление изменяется медленнее, чем входной ток. Поэтому для обеспечения минимума потерь мощности в тяговой сети, а также с целью обеспечения допустимых уровней напряжения при пуске необходимо определить оптимальные выходные параметры ТПЧ (начальное увеличение тока и время нарастания), которые обеспечивали бы реальные эффективные эксплуатационные режимы системы ТПЧ-тяговая сеть.

При разработке рациональных режимов тяговой сети учитывались различные сочетания начальных условий выходных параметров ТПЧ (рис. 4.2) и определено, что с изменением длины линии характер изменения скорости нарастания первичного тока изменяется (рис. 4.6). При этом получены новые области допустимых значений скорости нарастания выходного тока преобразователя, которые исключают перенапряжения (рис. 4.7).

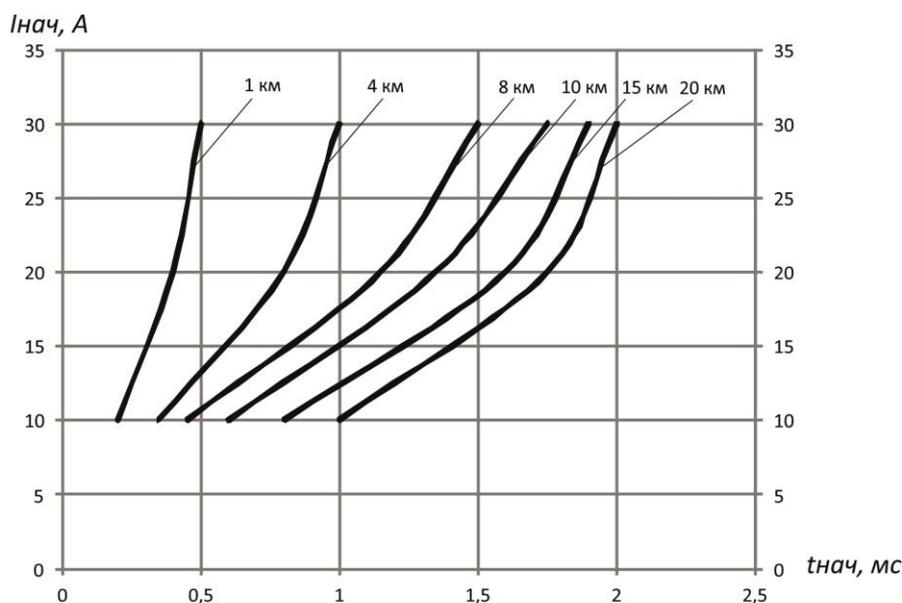


Рис. 4.6. Зависимости выходного тока ТПЧ от времени его нарастания для различной длины тяговой сети

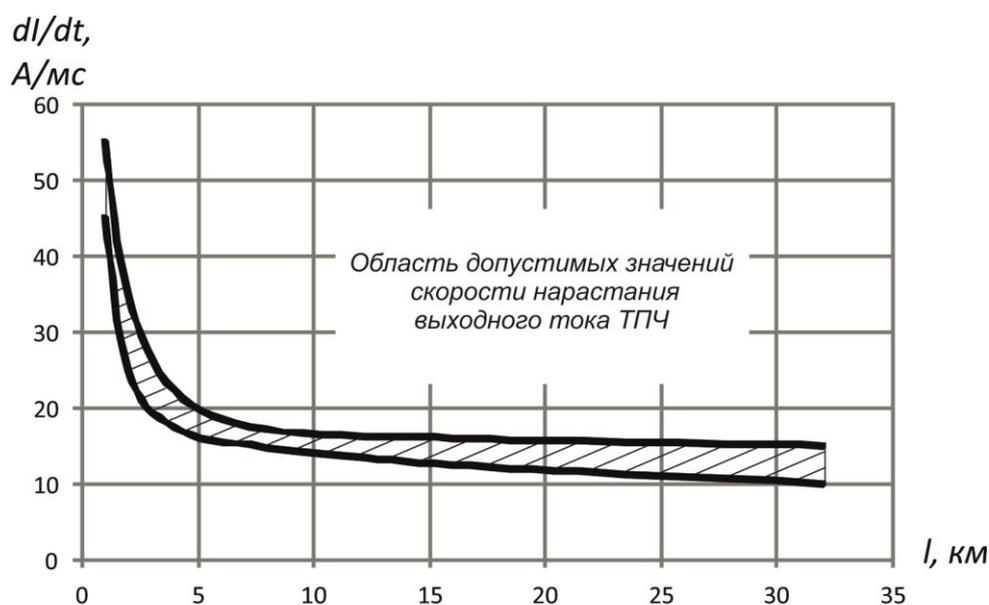


Рис. 4.7. Область допустимых значений скорости нарастания тока для различной длины тяговой сети

Реализация предложенных алгоритмов пуска возможна при использовании цифровой СИФУ управления тиристорами инвертора, которая реализует двухступенчатую характеристику нарастания тока в тяговой сети (рис. 4.8).

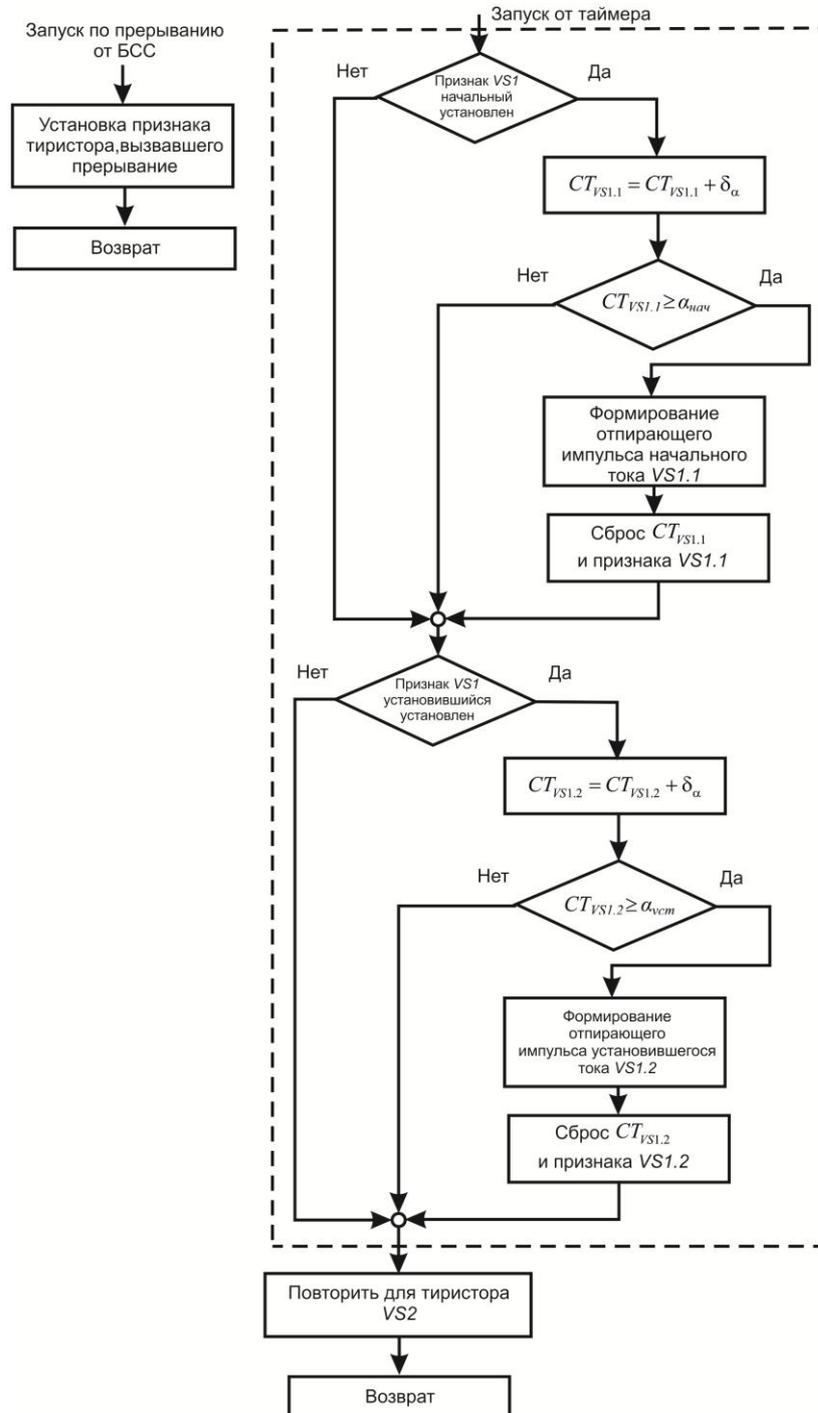


Рис. 4.8. Структурная схема подпрограммы цифровой СИФУ

СИФУ целесообразно реализовать с помощью микропроцессора. Программа СИФУ состоит из двух подпрограмм. Первая из них инициируется

появлением одного из сигналов на выходе блока связи с сетью (БСС) через узел прерывания. Эта подпрограмма запоминает, какой из выходов БСС вызвал прерывание – устанавливает соответствующий признак. Вторая подпрограмма запускается таймером, работающим с периодом  $\delta_\alpha/\omega_0$ . Эта подпрограмма добавляет к содержимым счетчиков, чьи признаки установлены, код  $\delta_\alpha$ , сравнивает содержимое счетчиков с кодом  $\alpha_3$  и при превышении кодом какого-либо счетчика кода  $\alpha_3$  формирует отпирающий импульс на соответствующий тиристор и затем сбрасывает этот счетчик и признак. Вторая подпрограмма реализует два условия, которые выбирают углы отпирания тиристорov, соответствующих начальному  $I_{нач}$  и установившемуся  $I_{уст}$  току тяговой сети.

Выполним оценочный расчет экономической эффективности предлагаемых алгоритмов пускового процесса тягового преобразователя на сеть. Принимая во внимание, что нормативно утвержденных рекомендаций по пуску ТПЧ не существует, оценим годовую стоимость потерь электроэнергии при реализации пускового процесса с током нарастания 10 А (1 вариант) и с током 40 А (2 вариант). Необходимо отметить, что этот расчет носит приближенный характер, поскольку число пусков ТПЧ за смену, сутки и год будет зависеть от производительности добычных участков и реализации эффекта «дремлющей сети» при отсутствии движущихся электровозов. Однако, получив значение потерь при определенных начальных условиях, и допущениях, возможно, оценить долевой вклад потерь при пусковых режимах в общих потерях электроэнергии в системе электроснабжения, а значит и в удельной стоимости электроэнергии на единицу добытого угля.

Наиболее доступным методом определения потерь электроэнергии в элементах электрических сетей является метод наибольших потерь [48]. Применяя данный метод и используя модели определения потерь мощности (рис.4.5) была определена годовая стоимость потерь электроэнергии в пусковом режиме для варианта 1 и 2. При этом принималась частота пуска ТПЧ – 10 раз за рабочую смену, учитывался один ТПЧ, работающий на однопутевую линию.

В расчетах принимался тариф, утвержденный НКРЭ для предприятий первого класса.

Стоимость потерь электроэнергии для варианта №1 –  $C_1=5000$  грн.

Стоимость потерь электроэнергии для варианта №2 –  $C_2=40000$  грн.

Таким образом, применяя полученные при решении оптимизационной задачи параметры пускового режима, экономическая эффективность составит 35 тыс. грн. в год. Несмотря на незначительную сумму экономии, необходимо отметить, что данная экономия получена без вложения капитальных затрат и является дополнением к основному эффекту оптимизации пусковых процессов. Реальная экономическая эффективность будет заключаться в снижении вероятности выхода из строя электрооборудования от перенапряжений.

### **Выводы**

1. Использование при реализации пускового режима ТПЧ на тяговую сеть полученных в данной работе рациональных параметров преобразователя позволяет за счет исключения перенапряжений обеспечить безопасные режимы работы элементов комплекса, уменьшить вероятность выхода из строя конденсаторов, снизить потребление электроэнергии и издержки на нее, а также увеличить срок службы оборудования за счет более рационального использования ресурса изоляции.

2. Используя предложенный подход перебора всех возможных комбинаций пускового тока, разработанная математическая модель определения параметров пускового режима транспорта с индукционной передачей энергии позволяет в отличие от существующих моделей учитывать влияние начальных режимных параметров тяговой сети на потери мощности в пусковом режиме. Это даёт возможность определить оптимальные параметры тока и времени его нарастания и минимизировать потери.

3. Условия, по которым возможна оценка энергетической эффективности функционирования комплекса, а именно учет максимально возможного напряжения на элементах тяговой сети и минимального тока преобразователя

стоит в основе постановки задачи оптимизации. Решение поставленной в данной диссертационной работе научной задачи заключается в подборе оптимального сочетания пускового тока преобразователя, при котором потери в тяговой сети минимальны и одновременно выполняется режим напряжения.

4. Задача оптимизации по двум критериям решалась относительно определения выходных параметров тягового преобразователя частоты в пусковом режиме, которая, в отличие от существующих, учитывает различные вариации исходных параметров. Это позволяет установить оптимальные пусковые параметры ТПЧ, которые приводят к снижению потерь мощности.

5. Результаты решения оптимизационной задачи, полученные по методу главного критерия, обеспечивают минимальное значение тока на допустимом интервале. Однако при этом  $t_{нач}$  принимает наименьшее из допустимых значений, что не является наилучшим сочетанием этих параметров. Метод последовательной уступки, наоборот, обеспечивает максимальное значение времени на допустимом интервале, но не дает минимального из допустимых значений тока  $I_{нач}$ . Наилучшие результаты дает метод свертки, так как полученное при этом значение начального тока достаточно близкое к минимальному значению из допустимого диапазона, а значение начального времени приближается к максимально допустимому.

6. Начальные условия для тока и времени нарастания при решении оптимизационной задачи, полученные с помощью разработанной математической модели, позволяют проанализировать значения тока по времени вдоль линии. Регрессионные зависимости тока от сечения линии являются основой построения новых моделей потерь мощности в тяговой линии и от достоверности их аппроксимации зависит точность определения потерь.

## РАЗДЕЛ 5

### ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ТЯГОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

#### 5.1 Оценка уровней высших гармоник, генерируемых тяговыми преобразователями частоты

Тяговый преобразователь частоты (ТПЧ) ТОВ1-160-1,2К-УХЛ4 для транспорта с индуктивной передачей энергии, разработанный Таллинским заводом «Преобразователь» имел ряд специфических конструктивных особенностей:

1. В преобразователе для поддержания стабилизированного тока в тяговой сети частотой 5 кГц применялся управляемый выпрямитель и звено постоянного тока с индуктивностями;

2. Инвертор реализован по схеме с четырьмя группами последовательно включенных тиристоров, образующих инвертор тока (рис. 5.1);

3. Поскольку ТПЧ работает на высокодобротную нагрузку, то форма тока в тяговой сети практически синусоидальна и дополнительных корректирующих устройств не требуется [64].

Для обеспечения нормальной работы преобразователя предъявляются достаточно жесткие требования для качества напряжения питающей электрической сети:

- Допустимые отклонения напряжения от  $+10\%U_{ном}$  до  $-5\%U_{ном}$ .
- Допустимые отклонения частоты  $\pm 2\%$  от номинальной.
- Коэффициент искажения кривой синусоидальности питающего напряжения (при отключенном ТПЧ) не более 5%.
- Коэффициент несимметрии по обратной последовательности не более 2 %.

- Допускаемые провалы напряжения питания вспомогательных цепей глубиной до 10% амплитудного значения и шириной не более 10 эл. градусов в любом участке синусоиды.

При пуске транспортного комплекса в реальных условиях основным проблемным вопросом обеспечения электромагнитной совместимости преобразователя с сетью стали высшие гармоники (ВГ) и несимметрия (НС) напряжений. Поскольку подземные шахтные сети обладают ограниченными значениями мощности КЗ из-за специфических норм и требований к системам электроснабжения угольных шахт (искробезопасность, обособленное питание подземных электроприемников, большая протяженность кабельных линий), то высшие гармоники и несимметрия в подземных сетях являются проблемным вопросом. Практически отсутствует возможность снижения уровней указанных электромагнитных помех стандартными сетевыми методами, которые распространены в общепромышленных системах электроснабжения. Также следует отметить, что уже на протяжении более 10 лет в специальной литературе активно обсуждаются проблемы, связанные с интергармониками, которые генерируются преобразователями в сеть. Таким образом, вопрос электромагнитной совместимости тяговых ТПЧ с учетом новых обстоятельств и состояния современных систем электроснабжения не утратил своей актуальности и требует решения.

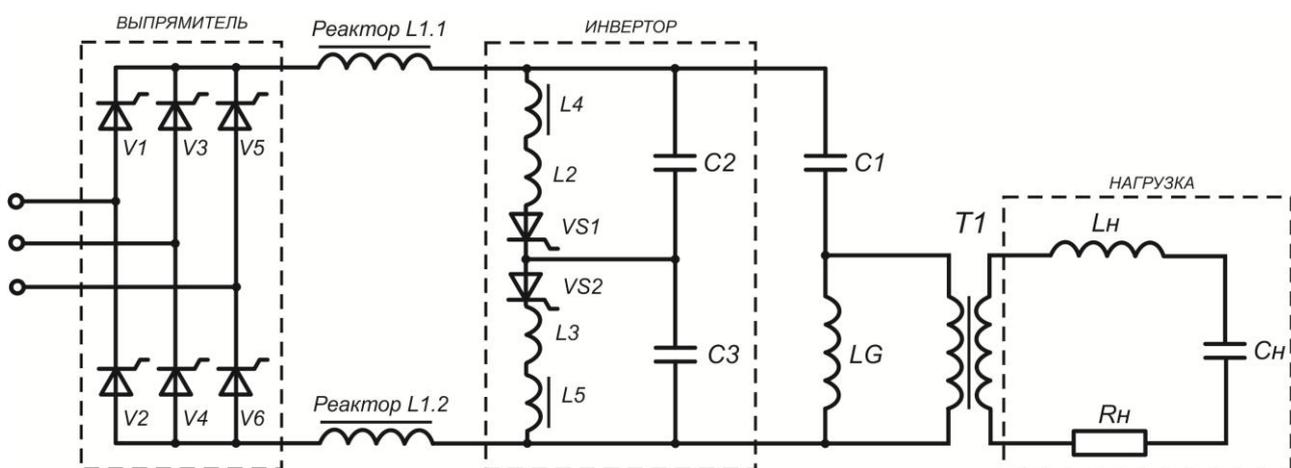


Рис. 5.1. Электрическая схема тягового преобразователя частоты

В схеме ТПЧ (рис. 5.1) использована 6-пульсная мостовая схема, где преобладающими являются 5, 7, 11, 13-я гармоники, называемые каноническими, уровни которых (по отношению к 1-й гармонике) обратно пропорциональны номеру, т.е.  $1/5, 1/7, 1/11, 1/13$  и т.д.

В практике расчета ВГ вентильных преобразователей различных типов выпрямитель учитывается как источник канонических ВГ тока, уровень которых обратно пропорционален номеру гармоник. Это соответствует случаю, когда индуктивность цепи постоянного тока  $L_d = \infty$ , а индуктивность контура коммутации  $L_k = 0$  [12, 13, 19, 40, 78, 81]. Кривые линейных токов имеют прямоугольно-ступенчатую форму длительностью 120 электрических градусов. В реальных условиях, в зависимости от соотношения  $L_d$  и  $L_k$ , эти кривые деформированы вследствие наличия пульсирующей составляющей цепи постоянного тока (рис. 5.2).

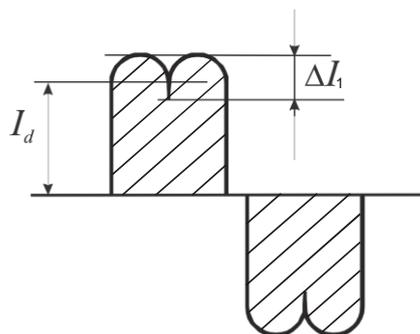


Рис. 5.2. Форма кривой сетевого тока ВП при  $L_d \neq \infty$

Наличие пульсаций сказывается на значении канонических гармоник в той мере, чем больше глубина пульсации, характеризуемая коэффициентом пульсации:

$$\lambda_I = \frac{I_{6m}}{I_d}.$$

Для основной гармоники  $I_I = I_d (1,10 + 0,14 \lambda_1)$ .

Для амплитуды канонических гармоник:

$$I_n = 100 \left( \frac{1}{n} + \frac{6,46 \lambda_I}{n-1} - \frac{7,13 \lambda_I}{n} \right) (-1)^k \quad \text{для } n = k_p - 1;$$

$$I_n = 100 \left( \frac{1}{n} + \frac{6,46 \lambda_1}{n+1} - \frac{7,13 \lambda_1}{n} \right) (-1)^k \quad \text{для } n = k_p + 1.$$

При определенных значениях  $\lambda_1$  относительные величины канонических ВГ могут быть рассчитаны по выражениям [12, 40, 75, 78, 81]:

n .....	5	7	11	13
$I_n^{(\lambda)}$ .....	$0,2 + 0,9 \lambda_1$	$0,14 + 0,21 \lambda_1$	0,091	$0,076 - 0,0087 \lambda_1$

Выражение для  $\lambda_1$  можно представить в виде:

$$\lambda_1 = \frac{U_{d0} K_{d6} \cos \alpha}{6 \omega_1 L_d I_d},$$

где  $U_{d0}$  – амплитуда выпрямленного напряжения;  $K_{d6}$  – коэффициент, учитывающий напряжение 6-й гармоники.

На рис. 5.3 представлены кривые зависимости четырех канонических гармоник в сети и двух гармоник постоянного тока.

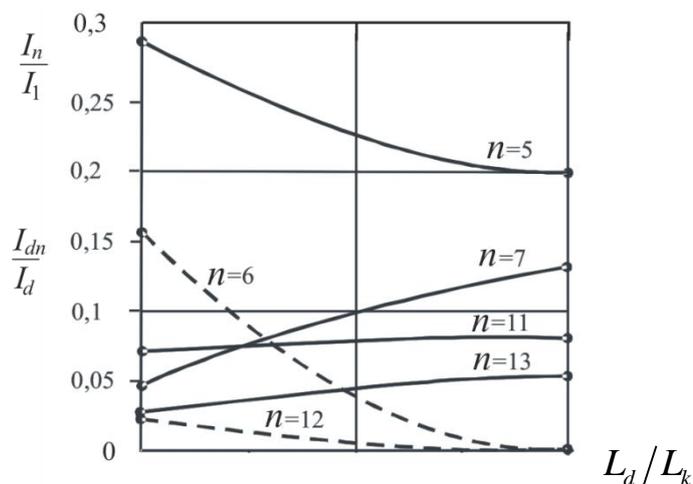


Рис. 5.3. Зависимость гармоник сетевого тока и тока нагрузки

от отношения  $L_d / L_k$

Из рассмотрения кривых рис. 5.3 можно заключить, что при снижении индуктивности  $L_d$  (или увеличения индуктивности контура коммутации  $L_k$ , что возможно при уменьшении мощности питающего ТПЧ трансформатора или мощности короткого замыкания в узле подключения РПП-6 кВ) существенно возрастает уровень 5-й гармоники сетевого тока и снижается уровень 7-й; уровни 11-й и 13-й гармоник изменяются незначительно. При тех же условиях возрастание уровня 6-й гармоники в сети пульсирующего тока приводит к аналогичному увеличению уровня ВГ в кривых сетевого тока.

Полученные зависимости позволяют оценить глубину пульсаций первичного тока ТПЧ при изменении параметров нагрузки тягового преобразователя и состояния системы электроснабжения шахты. Это позволит оценить и прогнозировать режимы совместной работы ТПЧ и электрической сети, при которых критически нарушается электромагнитная совместимость и возможна нестабильная работа преобразователя.

## **5.2 Определение дополнительных потерь мощности и энергии в системе электроснабжения горных предприятий**

Высшие гармоники в электрических сетях нежелательны из-за целого ряда последствий для системы электроснабжения шахты – они негативно влияют на техническое состояние электрооборудования и ухудшают экономические показатели его работы. Все это определяет наличие дополнительных потерь мощности и энергии, которые ухудшают тепловой режим электрооборудования, усложняют компенсацию реактивной мощности с помощью батарей статических конденсаторов. Сокращается срок работы электрических машин и аппаратов из-за ускоренного старения изоляции, наблюдаются сбои в работе устройств системной и сетевой автоматики, средств телемеханики.

Действие высших гармоник неявно выражено и имеет кумулятивный эффект. Поэтому их последствия, в виде разрушения изоляции электрических машин и кабелей, проявляются через определенный промежуток времени.

Искажение формы кривой напряжения влияет на возникновение и протекание процессов старения изоляции. При наличии газовых включений в изоляции возникает ионизация, физический смысл которой заключается в создании объемных зарядов и последующей их нейтрализации. Нейтрализация зарядов связана с рассеиванием энергии, следствием чего есть электрическое, механическое и химическое влияние на окружающий диэлектрик. Все это вызывает развитие местных дефектов в изоляции, что приводит к сокращению срока службы изоляции. При наличии высших гармоник в кривой напряжения процесс старения изоляции протекает более интенсивно, особенно в кабелях и конденсаторах. Некоторые авторы утверждают, что при значении высших гармоник в 5% через два года эксплуатации  $tg\delta$  конденсаторов увеличивается в два раза [13, 19, 40, 78, 81].

При протекании токов высших гармоник по элементам электрических сетей и электрооборудованию потребителей возникают дополнительные потери активной мощности и электрической энергии.

Наибольшее значение потерь активной мощности от высших гармоник наблюдается в трансформаторах, двигателях, генераторах, воздушных и кабельных линиях электропередач. Увеличение активных сопротивлений указанных элементов с увеличением частоты пропорциональны величине  $\sqrt{\nu}$ , несмотря на то, что это несколько неточное приближение [13, 19, 40, 78, 81]. В некоторых случаях дополнительные потери могут привести к недопустимому перегреву и выходу из строя электрооборудования. Значение дополнительных потерь активной мощности и энергии определяется режимом работы электрооборудования и уровнем высших гармоник в сети.

Оценочный расчет дополнительных потерь электроэнергии в распределительной электрической сети шахты выполнен на основе расчета уровня токов высших гармоник на зажимах тягового преобразователя.

Значение дополнительных потерь активной мощности в кабельных ЛЭП определяется следующим образом:

$$\Delta P_{\text{доп}v} = 3 \sum_{v=3}^n I_v^2 R_v, \quad (5.1)$$

где  $I_v$  ток  $v$ -й гармоники;  $R_v$  - сопротивление активное сопротивление ЛЭП на частоте  $v$ -й гармоники.

В общем виде активное сопротивление кабельных ЛЭП рекомендуется определять по зависимости [13, 19, 40, 78, 81]:

$$R_v = R_2 K_r K_{rv}, \quad (5.2)$$

где  $R_2 = r_0 l$  - активное сопротивление обратной последовательности ЛЭП;  $K_r = \sqrt{v}$  - коэффициент, который учитывает изменение активного сопротивления от частоты;  $K_{rv}$  - поправочный коэффициент, который учитывает распределенность параметров в схеме замещения (поскольку длины кабелей в пределах лавы менее 1 км, то распределенность параметров можно не учитывать, поэтому  $K_{rv} = 1$ ).

Результаты расчетов дополнительных потерь в кабельных ЛЭП и трансформаторах представлены в виде таблиц 5.1. и 5.2. Анализировался гармонический спектр токов, в расчетах учитываются 5, 7, 11, 13.

Таблица 5.1

Оценочный расчет уровней дополнительных потерь в трансформаторах

Тип трансформатора	$\Delta P_{кз}$ , кВт	Потери в нормальном режиме $\Delta P_T$ , кВт	Дополнительные потери от ВГ, $\Delta P_{\text{доп}}$ , кВт
ТСВП-160	1,9	1,216	0,057
ТСВП-250	2,8	1,792	0,084
ТСВП-400	3,6	2,304	0,108
ТСВП-630	4,7	3,008	0,141

Таблица 5.2

Оценочный расчет уровней дополнительных потерь в КЛ

Марка кабелей, применяемая в подземных выработках	Наиболее распространенные сечения токопроводящих жил	$r_0$ , Ом/км	Дополнительные потери от ВГ, на 100 метров кабеля $\delta P_{лон}$ , кВт
КШВЭБШВ ВЭВБШВ СБН	50	0,363	0,65
	70	0,26	0,5
	95	0,191	0,45
	120	0,151	0,3

При принятии допущения, что все участки подземной кабельной сети выполнены кабелем одного сечения, возможно вывести коэффициент, учитывающий электрическую удаленность источника электромагнитной помехи в сети. При оценочном расчете уровней электромагнитной совместимости этот коэффициент приводится к длине кабельной линии и указывает зоны надежной и неустойчивой работы ТПЧ от качества напряжения. В таблице 5.2 определены оценочные уровни дополнительных потерь активной мощности в силовых кабелях, приведенные к 100 м длины кабельной линии.

### 5.3 Экономический ущерб от снижения качества напряжения

Для количественной оценки электромагнитного ущерба в системе электроснабжения угольной шахты от несинусоидальности напряжения необходимо определить значения показателей несинусоидальности на различных ступенях распределения электроэнергии шахты (рис. 5.4). Предлагается установить следующие характерные узлы нагрузки для оценки показателей качества:

- сторона НН подземной передвижной подстанции – точка К1;
- сторона ВН подземной передвижной подстанции – точка К2;
- сборные шины РПП-6 кВ – точка К3;
- сборные шины ЦПП-6 кВ – точка К4;
- сборные шины 6 кВ ГПП – точка К5.

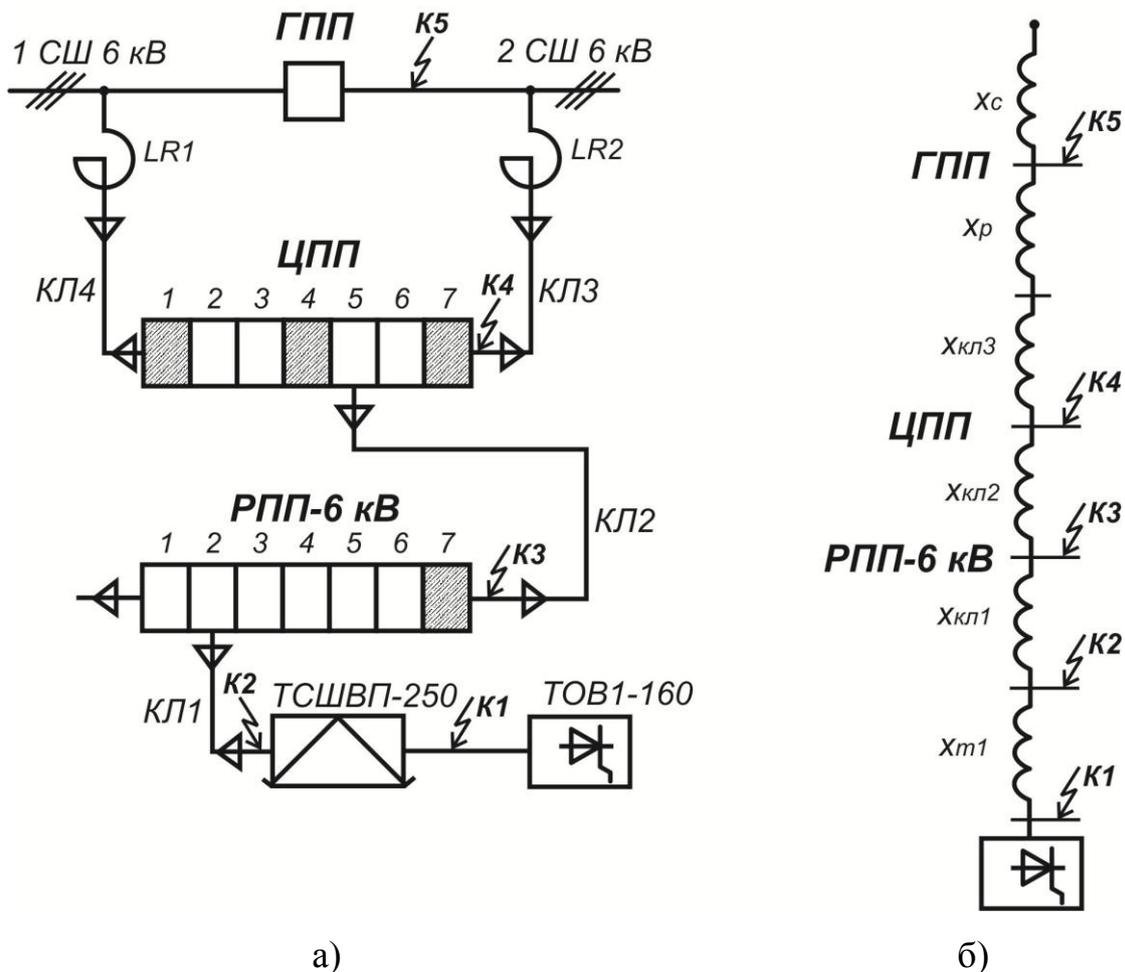


Рис. 5.4. Электрическая схема подземной сети угольной шахты (а) и ее схема замещения (б)

Система электроснабжения угольной шахты является большой динамической системой, постоянные времени основных элементов которой достаточно высоки; поэтому они могут рассматриваться как широкопостоянные элементы, параметры которых в частотном спектре огибающей напряжения (0,1 – 15 Гц) практически неизменны и их можно считать линейными. При составлении схем замещения силовых элементов (трансформаторов, реакторов, большинства нагрузок) модуль передаточной функции может быть представлен коэффициентом передачи с общим выражением

$$K = \frac{x_{\text{сист-К}}}{x_{\text{сист-К}} + x_{\text{ТПЧ-К}}}, \quad (5.4)$$

где  $x_{\text{сист-К}} = x_c + x_\Sigma$  – суммарное индуктивное сопротивление сети до точки определения уровня помехи;

$x_{\text{ТПЧ-К}} = x_{\text{ТПЧ}} + x_\Sigma$  – индуктивное сопротивление цепи ТПЧ до точки определения уровня помехи.

Сопротивления рассчитываются по схеме замещения СЭС, выполненной для расчета токов КЗ. В зависимости от расчетных величин может быть различное значение коэффициента искажения кривых напряжения  $K_U$  при расчетах несинусоидальных режимов.

В таблице 5.3 представлены значения коэффициентов передачи  $K$  для типовых трансформаторов подземных подстанций с  $U_{\text{ном}} = 6$  кВ и различными значениями мощности КЗ. Во всех случаях исходной точкой (узлом) расчета по таблицам являются значения нелинейной нагрузки на шинах источника несинусоидальности (подключение преобразователя ТОВ).

Таблица 5.3. Значения коэффициентов передачи для типовых подземных передвижных трансформаторных подстанций с  $U_{вн} = 6$  кВ

$S_{ном.т}, \text{кВ}\cdot\text{А}$	$S_{к.з.с}, \text{МВ}\cdot\text{А}$	Коэффициент передачи		
		$K_{тов-рпп}$	$K_{рпп-цпп}$	$K_{цпп-гпп}$
160	50	0,122	0,488	0,224
	75	0,104	0,386	0,177
	100	0,095	0,323	0,153
250	50	0,153	0,604	0,292
	75	0,125	0,502	0,228
	100	0,112	0,433	0,195
400	50	0,195	0,706	0,234
	75	0,156	0,613	0,187
	100	0,136	0,546	0,143

Для адекватной оценки электромагнитного ущерба от несинусоидальности напряжения в системе электроснабжения необходима разработка нового представления преобразователя частоты (ПЧ) как элемента системы электроснабжения. Принципиально новый подход заключается в учете канонических гармоник в спектре первичного тока преобразователя и анализе интергармоник инвертора, пересчитанных через коммутационную функцию.

Современный частотно-регулируемый электропривод на угольных шахтах Украины сегодня рассматривается как мощный инструмент управления технологическими процессами добычи и транспортировки угля. Все более часто на основных технологических звеньях производства (подъем породы и угля, водоотлив, проветривание горных выработок) устанавливают преобразователи частоты, работающие по схеме преобразователя со звеном постоянного тока (в том числе и для подземного транспорта повышенной частоты). Применение частотно-регулируемого электропривода экономически обосновано, когда необходимо управлять производительностью машин и механизмов в широком диапазоне рабочих значений. В этом случае получают оптимальное потребление электроэнергии с минимальными удельными расходами [12, 81]. Однако необходимо отметить, что мощные частотные

преобразователи являются источниками высших гармоник тока и напряжения, что негативно сказывается на качестве напряжения в системах электроснабжения и электромагнитной совместимости электрооборудования. В зависимости от схемы выпрямителя и законов управления в спектре искажений присутствуют канонические высшие составляющие и боковые частоты (интергармоники), содержание которых в относительных единицах может достигать 40% тока основной гармоники [12]. Анализом и синтезом кривой входного тока преобразователей частоты при различных нагрузочных режимах неоднократно занимались отечественные и зарубежные ученые (Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., Железко Ю.С, Гриб О.Г., Волков А.В.) [12, 13, 19, 40, 81]. Мощности современных высоковольтных преобразователей частоты достигают 20 МВт, что позволяет утверждать о значительном их влиянии на систему электроснабжения и другие электроприемники, подключенные к общему узлу нагрузки. Представление ПЧ как элемента системы электроснабжения, обоснование математического аппарата для анализа режимов работы и генерации высших гармоник, совместный учет параметров системы электроснабжения, преобразователя и другой комплексной нагрузки при моделировании показателей качества в узле нагрузки энергетических объединений – все это новые актуальные направления электроснабжения и электромагнитной совместимости. Решение указанных вопросов возможно при комплексном подходе в решении научных задач и практической проверке результатов.

Подробный анализ технических характеристик и электрических схем частотных преобразователей для асинхронных электродвигателей показал, что предприятия-изготовители на сегодняшний день используют схемы выпрямитель-инвертор со звеном постоянного тока [19]. Схемы непосредственных преобразователей (циклоконвекторов) не разрабатываются и в новых ПЧ не применяются.

Поскольку внедрение мощных ПЧ в системах электроснабжения предприятий горно-металлургического комплекса Украины на сегодня это

свершившийся факт, то при моделировании режимов ПЧ как элемента СЭС необходимо представить начальные условия, которые учитывают режимы питающей энергосистемы, параметры обобщенной нагрузки, компенсирующие емкости батарей конденсаторов, схему и режим преобразователя. На начальном этапе моделирования предлагается представить ПЧ в схемах замещения с двумя источниками тока (рис.5.5).

Нагрузка ПЧ в схеме замещения представлена в виде двух комплексных сопротивлений:  $z_{Hv}(f, t)$  - составляющая сопротивления, определяющая канонические частоты;  $z_{Hh}(f, t)$  - составляющая сопротивления, на частотах интергармоник.

Обобщенная линейная нагрузка узла представлена в виде комплексного сопротивления  $z_{H1}(f, t)$  в состав которого входит емкостная составляющая сопротивления батарей статических конденсаторов (БСК). Емкость батарей необходимо учитывать при анализе и прогнозировании резонансных процессов в системе электроснабжения.

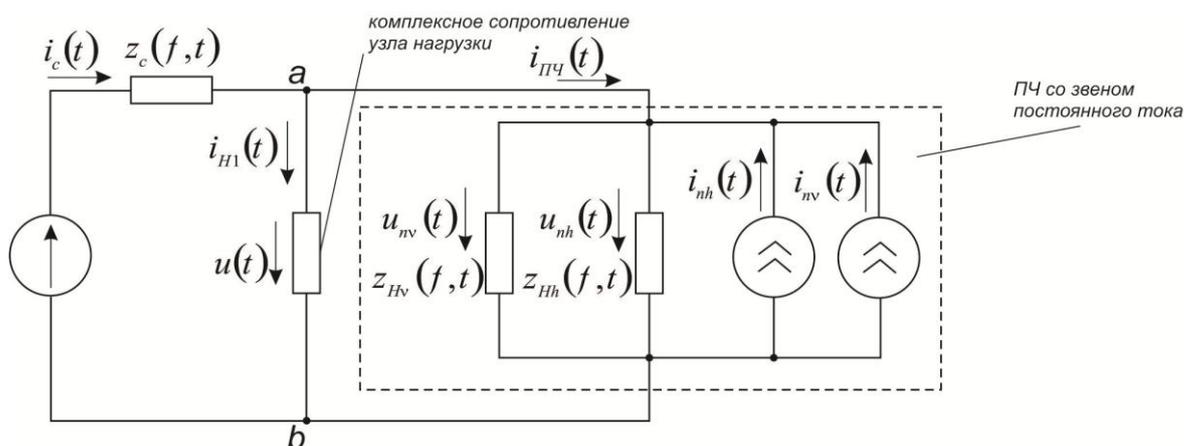


Рис.5.5. Схема замещения ПЧ со звеном постоянного тока

При моделировании в качестве узла нагрузки предлагается использовать шины 6...10 кВ ГПП угольной шахты.

Обобщенная нагрузка  $z_{H1}(f, t)$  состоит из нескольких, характерных для угледобывающего предприятия групп нагрузки (рис. 5.6):

- ветвь «кабельная ЛЭП – асинхронный (АД) или синхронный (СД) двигатель» (рис. 5.6, б). Основную долю энергобаланса шахты занимают подъемные машины, вентиляторы, насосы, компрессоры;

- ветвь «кабельная линия - БСК» (рис. 5.6, а). Компенсация реактивной мощности обязательная и предписывается руководящими документами;

- схемы обособленного питания подземных электроприемников (рис. 5.6,в). В схемах электроснабжения угольных шахт применяют реактивное ствольных кабелей к центральным подземным подстанциям (ЦПП) или подключение кабелей через разделительные трансформаторы.

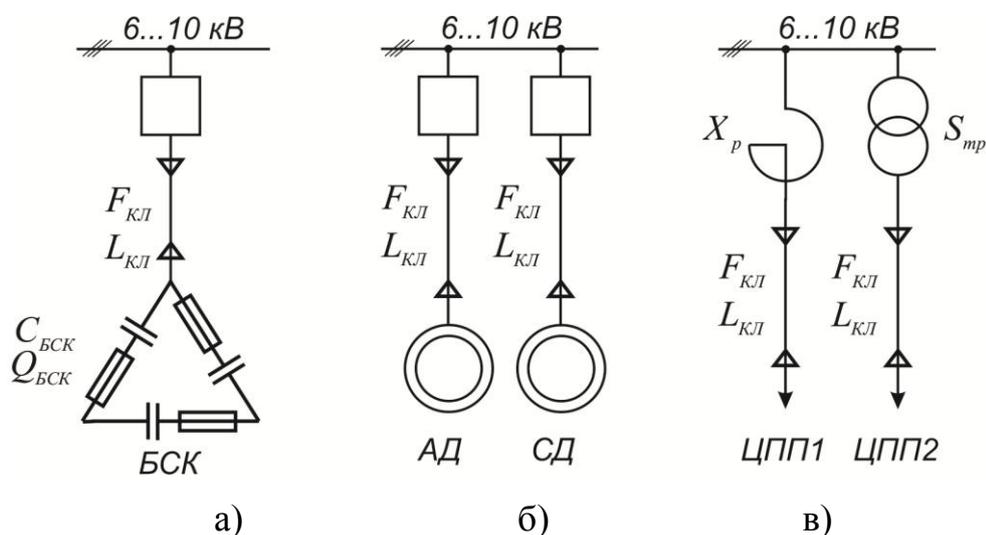
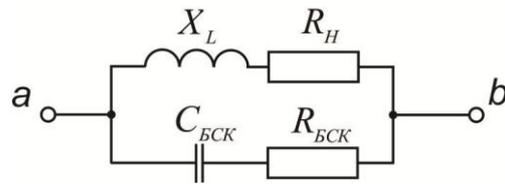


Рис.5.6. Характерные группы электроприемников для узлов нагрузки угольных шахт

В результате преобразования всей нагрузки секции 6...10 кВ необходимо прийти к виду схемы замещения, показанной на рис. 5.7.



$X_L$  – индуктивное сопротивление КЛ, трансформаторов, АД и СД;

$R_H$  – активное сопротивление КЛ, трансформаторов, АД и СД;

$R_{БСК}$  – активное сопротивление ветви БСК;

$C_{БСК}$  – емкость БСК.

Рис. 5.7. Эквивалентная схема замещения обобщенной нагрузки

Из схемы замещения (рис. 5.7) определяется комплексное сопротивление обобщенной нагрузки:

$$\dot{Z}_{H1} = \frac{(R_H + jX_L)(R_{БСК} - jX_{БСК})}{R_H + jX_L + R_{БСК} - jX_{БСК}} \quad (5.5)$$

При моделировании принимаем следующие допущения:

1. Схема замещения ПЧ состоит из двух параллельно включенных источников тока. Обоснованность допущения заключается в том, что искажение кривой входного тока преобразователя определяется каноническими высшими гармониками выпрямителя и интергармониками инвертора, уровень которых зависит от выходной частоты. В частных случаях возможен нулевой фон интергармоник.

2. Напряжение на зажимах ПЧ полагаем заведомо несинусоидальным:

$$u(t) = U_1 [\sin \omega t + U_v \sin(v\omega t + \varphi_v)] \quad (5.6)$$

Исходя из принятых допущений, используя общие законы электротехники определяются параметры схемы замещения узла нагрузки с преобразователями частоты.

- Сетевой ток:

$$i_c(t) = i_{ПЧ}(t) + i_{H1}(t). \quad (5.7)$$

- Ток в нагрузке (ПЧ):

$$i_{ПЧ}(t) = i_{nv}(t) + i_{nh}(t). \quad (5.8)$$

- Ток выпрямителя (переключающая функция):

$$i_s(t) = \sum_{v=1}^{\infty} I_{mv} \sin(v\omega_1 t + \varphi_v). \quad (5.9)$$

- Пульсирующий ток инвертора:

$$i_n(t) = \frac{1}{2} I_d [\cos \alpha_s + \cos(\alpha_s + \gamma_s)] + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{U_{dv8} \cos(np_2 \omega_1 t + \varphi_{v8})}{\sqrt{R_d^2 + (np_2 X_d)^2}} + \frac{U_{dvs} \cos(np_2 \omega_2 t + \varphi_{vs})}{\sqrt{R_d^2 + (np_2 \chi X_d)^2}} \right] \cdot (-1)^{n+1}, \quad (5.10)$$

где  $\omega_1$  и  $\omega_2$  - входная и выходная частота ПЧ;  $p_2$  - число пульсаций инвертора;  $\chi$  - относительная частота;  $n$  - номер гармоники.

- Комплексные сопротивления схемы замещения ПЧ записываются в виде:

$$z_{Hv}(t) = \frac{u(t)}{i_s(t)}, \quad z_{Hh}(t) = \frac{u(t)}{i_n(t)}. \quad (5.11)$$

Подобное представление преобразователя частоты как элемента системы электроснабжения и разработанная схема замещения позволяют учитывать начальные фазы высших гармоник и интергармоник, выходную частоту инвертора, углы управления выпрямителя и инвертора, сетевые гармонические искажения.

Электромагнитная составляющая ущерба при несинусоидальности напряжения характеризуется увеличением потерь активной мощности, увеличением потребления активной и реактивной мощностей, ускорением процесса старения изоляции электрооборудования, ограничением области применения конденсаторных батарей для повышения коэффициента мощности.

Таким образом, ущерб от потерь электроэнергии (электромагнитная составляющая ущерба) за год [13]:

$$U_{\text{Э}} = \Delta P_{\text{а,доп}} C_{\text{Э}} T_{\text{П}},$$

где  $\Delta P_{\text{а,доп}}$  - дополнительные потери активной мощности от ВГ;  $C_{\text{Э}}$  – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии на данном предприятии (принимается актуальный тариф, утвержденный НКРЭ для предприятий 2 класса);  $T_{\text{П}}$  - время действия наибольших искажающих нагрузок.

В результате исследований получены граничные значения электромагнитного ущерба в основном электрооборудовании (трансформаторы и асинхронные двигатели). Мощность трансформаторов передвижных подземных подстанций принималась в диапазоне 160...630 кВ·А, мощность АД в диапазоне 10...100 кВт.

При оценке уровней дополнительных потерь впервые определены показатели графика изменения токов высших гармоник на основании статистических данных, полученных при выполнении научных работ на угольных шахтах «ДТЭК Павлоградуголь». Эти коэффициенты описывают характер изменения ВГ в течение смены, суток, года. Таким образом, можно утверждать о достоверности определения среднесменного и суточного значения

времени наибольших искажающих нагрузок, которое используется в методе определения потерь активной мощности.

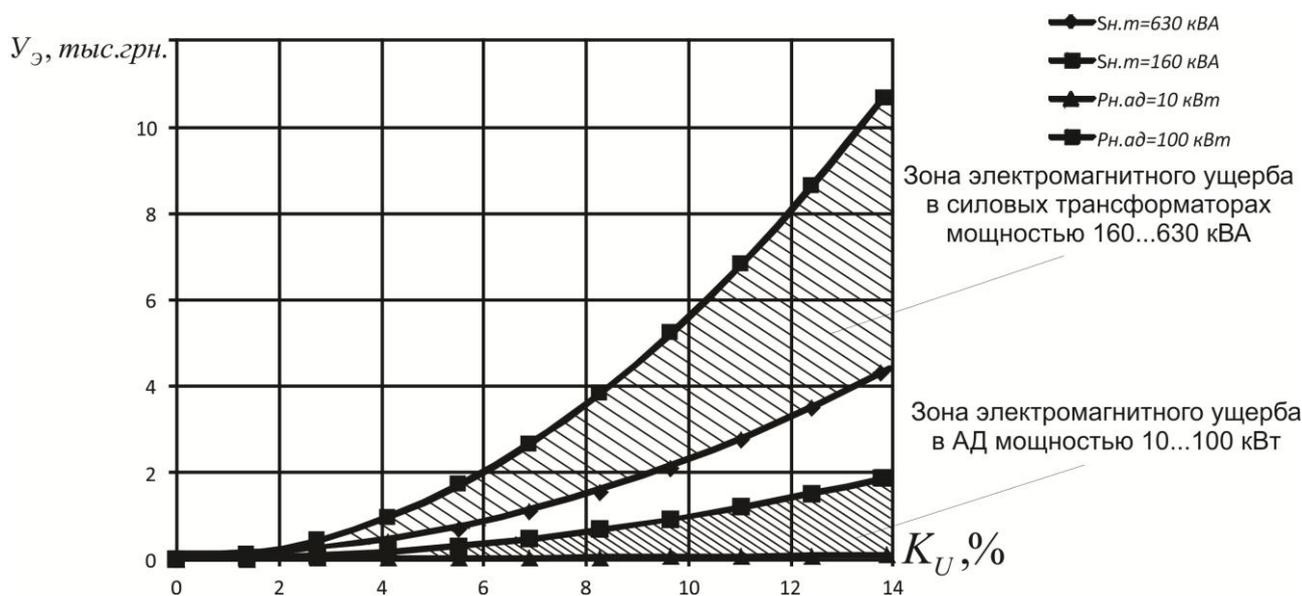


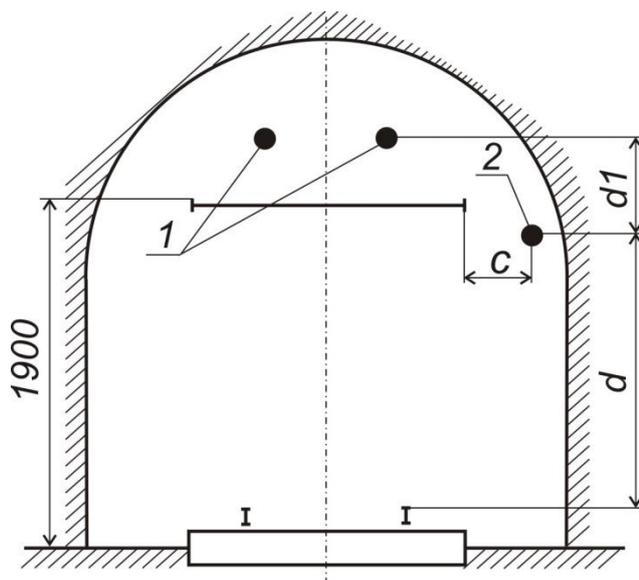
Рис. 5.8. Граничные зависимости годового электромагнитного ущерба в трансформаторах и АД

Отличительной особенностью полученных на рис. 5.8 зависимостей является использование информации о характере изменения токов ВГ, полученных экспериментальным путем. Ранее не существовало научно обоснованных взаимосвязей между значением тока ВГ и технологическим режимом электроприемника. Таким образом, для точного определения электромагнитного ущерба в системе электроснабжения, оценке возможности подключения ТПЧ транспорта в той или иной точке электрической сети и возможности выполнения условий электромагнитной совместимости других нелинейных электроприемников необходимо учитывать технологические особенности отдельных звеньев, имеющих частотный привод.

#### **5.4 Оценка искробезопасности тяговых сетей повышенной частоты**

Частый пуск тягового преобразователя обусловлен технологическими ограничениями работы шахтного транспорта, поэтому переходные процессы в тяговой линии возникают систематически. Это особенно актуально при реализации эффекта «дремлющей сети» при отсутствии движущихся электровозов на линии. Научная задача данной диссертационной работы решает проблему энергетической эффективности работы комплекса и ограничения перенапряжений, однако существуют проблема искробезопасности посторонних проводников в подземных выработках, выполнение условий которой необходимо для безопасной работы шахты. При работе транспорта с индуктивной передачей энергии возникает электромагнитное поле, в котором составляющая электрического поля такова, что допустимо полагать наведение ЭДС в посторонних проводниках следствием только возникновения магнитного поля. Поэтому при исследовании искробезопасности электрических цепей, образующихся в подземной выработке, учитываются только параметры магнитного поля. Посторонние проводники образуют электрические контуры, которые вследствие воздействия тока тяговой сети могут стать искроопасными. Это, например, контуры, образованные броней кабеля постороннего проводника и землей, броней кабеля и трубопроводом, рельсовыми путями, броней кабеля и рельсовым путем, трубопроводом и землей и др. Искробезопасность посторонних контуров определяется, исходя из параметров установившегося режима [60, 68, 70, 73], однако неизвестно как на нее влияют переходные процессы в тяговой сети, специфика которых обуславливает появление высших гармонических составляющих и другие явления, способные изменить условия искробезопасности посторонних проводников. В связи с этим в ряду мер по повышению безопасности эксплуатации транспорта с индуктивной передачей энергии важной является оценка влияния переходных процессов в тяговой сети на искробезопасность посторонних проводников и сравнение параметров искробезопасных зон для установившегося и переходных режимов.

Оценка искробезопасности для различных видов контуров, образованных посторонними проводниками, при установившемся режиме работы тяговой сети, показывает, что наиболее опасным является контур, образованный броней кабеля и землей [73]. Для исключения искроопасности посторонних контуров в тяговой сети применяется транспозиция ее кабелей. Искробезопасный шаг транспозиции - максимально допустимое расстояние между пунктами транспозиции, при котором не возникают искроопасные токи, рассчитывается исходя из параметров наиболее опасного контура. В качестве исходных данных для расчета используются результаты маркшейдерских замеров, выполненных на фиксированных участках выработки. Ими являются:  $c$  - зазор между кромкой подвижного состава и вертикальной осью постороннего проводника;  $d$  - высота подвески кабеля постороннего проводника над головкой рельс;  $d_1$  - расстояние между горизонтальными осями кабелей тяговой сети и постороннего проводника (рис. 5.9).



1. Кабели тяговой сети;
2. Посторонний проводник.

Рис. 5.9. Расположение тяговой сети и постороннего проводника в сечении однопутевой выработки

Критерием для оценки искробезопасности постороннего контура является искробезопасный ток  $I_{II}$ , который устанавливается по минимальному воспла-

меняющему току  $I_B$  и коэффициенту искробезопасности  $K_H$ . Посторонний контур считается искробезопасным, если максимально возможный в нем ток короткого замыкания  $I_{KЗ}$  меньше искробезопасного:

$$I_{KЗ} < I_H = I_B / K_H, \quad (5.12)$$

где  $I_{KЗ}$  – ток короткого замыкания;  $I_H$  – искробезопасный ток;  $I_B$  – воспламеняющий ток;  $K_H$  – коэффициент искробезопасности.

Ток  $I_{KЗ}$  определяется отношением напряжения, наводимого тяговой сетью в контуре, и полного сопротивления этого же контура. ЭДС, индуцируемая тяговой сетью, определяется соотношением:

$$E = -jI\omega M, \quad (5.13)$$

где  $I$  – ток в тяговой сети;  $\omega$  – угловая частота;  $M$  – взаимная индуктивность тяговой сети и участка постороннего контура, которая определяется, исходя из расположения кабелей тяговой сети и постороннего проводника.

Минимальный воспламеняющий ток является функцией напряжения и индуктивности постороннего контура, которая в свою очередь зависит от частоты [60, 64]. При рассмотрении искробезопасности посторонних контуров в установившемся режиме использованы графические зависимости воспламеняющего тока для основной гармоники частоты, определяющей соответствующие параметры контура, в частности, его индуктивность. В переходном процессе изменяется распределение тока по сечению проводников, образующих контур и соответственно изменяется распределение в пространстве магнитного потока, сцепленного с контуром, а, следовательно, изменяется и индуктивность контура. При синусоидальном токе индуктивность является функцией угловой частоты тока, а при несинусоидальном

периодическом - она является еще и функцией формы кривой тока. Очевидно, в этом случае минимальный воспламеняющий ток должен определяться зависимостью для более высоких частот. Следовательно, изменение формы кривой тока тяговой сети в переходных процессах и появление высших гармонических составляющих обуславливает необходимость оценки влияния этих факторов на расчет искробезопасного шага транспозиции. Выполнить эту оценку возможно на основании сравнения искробезопасных зон для посторонних контуров при работе тяговой сети в установившемся и переходных режимах.

Исследование пускового режима - одного из переходных режимов работы тяговой сети, проведенное ранее, показывает, что значения тока тяговой сети при пуске всегда меньше установившихся. При этом изменяются значения наводимых ЭДС, определяемые в соответствии с (5.12), и создаваемых ими токов  $I_{кз}$ , а также воспламеняющих токов. Изменения параметров посторонних контуров наблюдаются и в результате сброса-наброса нагрузки от электровозов. Исходя из этих предпосылок необходимо построить искробезопасные зоны для посторонних контуров, используя параметры переходных режимов, и сравнить их с зонами, полученными для установившегося режима.

Поскольку индуктивности при неизменности всех прочих условий (магнитной проницаемости, удельной проводимости вещества провода) зависят от частоты, появление высших гармонических составляющих в переходных процессах требует применения иных зависимостей для расчета собственной индуктивности контура. Так как поверхностный эффект и эффект близости при прочих равных условиях выражены тем резче, чем выше частота тока, то при расчете индуктивностей различают случаи постоянного тока и низкой частоты, высокой и сверхвысокой частот. Стабилизация значения тока тяговой сети в установившемся режиме допускает использование в расчете искробезопасного шага транспозиции выражений для случая низкой частоты. В переходном процессе такое допущение неприемлемо, поскольку при этом распределение

тока по сечению проводника не будет равномерным и изменится вид зависимости, определяющей значение воспламеняющего тока, аргументами которой являются наводимое в контуре напряжение и его собственная индуктивность. Поэтому расчет собственных индуктивностей посторонних проводников для определения искробезопасного шага транспозиции с учетом переходных процессов в тяговой сети необходимо выполнять, исходя из допущения, что переходный процесс соответствует случаю высокой частоты.

При расчете тока короткого замыкания  $I_{кз}$  параметрами, зависящими от частоты, являются ЭДС, наводимая тяговой сетью на участке постороннего контура, полное сопротивление этого участка и его индуктивность. ЭДС, вычисляемая из выражения (5.12), зависит от угловой частоты  $\omega$  и взаимной индуктивности, которая определяется параметрами расположения постороннего контура и тяговой сети. Для оценки влияния режимов работы тяговой сети на искробезопасность посторонних контуров необходимо обозначить зависимости, которыми определяются вышеперечисленные параметры.

При получении расчетных зависимостей для установившегося режима приняты допущения: постоянными являются частота  $f$ ; проводимость земли  $g_z$ ; магнитные проницаемости материалов  $\mu$ ; толщина брони; ширина ленты для шахтных кабелей [54, 64]. Для расчета индуктивности контура при этом использовано выражение:

$$L_K = \mu_0 \cdot \frac{1}{2\pi} \left( \ln \left( \frac{2l}{rs} \right) - 1 \right), \quad (5.14)$$

где  $L_K$  - индуктивность контура;  $\mu_0$  - магнитная постоянная;  $l$  - длина постороннего проводника;  $r$  - внешний радиус поперечного сечения постороннего проводника;  $s$  - коэффициент, учитывающий соотношение внутреннего и внешнего радиусов постороннего проводника.

Взаимная индуктивность  $M$ , которая при любых частотах определяется одинаковыми выражениями [68], зависит от того, выполнена тяговая сеть двумя или четырьмя кабелями (одно- или двухпутевая выработка). Направление протекания тока в кабелях тяговой сети при двухпутевой выработке влияет на искробезопасность контура. Известно, что она повышается, если токи в крайних кабелях тяговой сети протекают в одном направлении [73, 68]. Взаимная индуктивность такой системы проводников определяется зависимостью:

$$M = l \cdot \mu_0 \cdot \frac{1}{4\pi} \cdot \left( \ln \left( \frac{\Pi_1}{\Pi_2} \right) \right), \quad (5.15)$$

где  $l$  - длина параллельного пробега тяговой сети и постороннего контура;  $\mu_0$  - магнитная постоянная;  $\Pi_1$  - произведение расстояний между центрами инерции поперечных сечений кабелей тяговой сети и постороннего контура, токи в которых противоположно направлены, а  $\Pi_2$  - произведение расстояний между центрами инерции поперечных сечений кабелей тяговой сети и постороннего контура, токи в которых одинаково направлены.

Анализируя зависимость для взаимной индуктивности, полученную в [68] для двухпутевой выработки в установившемся режиме, следует отметить, что при ее выводе были приняты следующие допущения: диаметр брони считался минимальным и равным 0,017 м; расстояние от горизонтальной оси постороннего проводника до поверхности выработки равно 0,1 м; зазор между подвижными составами  $m$  постоянен и равен 0,25 м и расстояние между соседними кабелями тяговой сети  $a_1$  постоянно и равно 1,2 м. При этом обратный провод постороннего контура условно считался зеркальным отображением прямого провода за крепью на расстоянии  $b/2$  от нее (рис. 5.10).

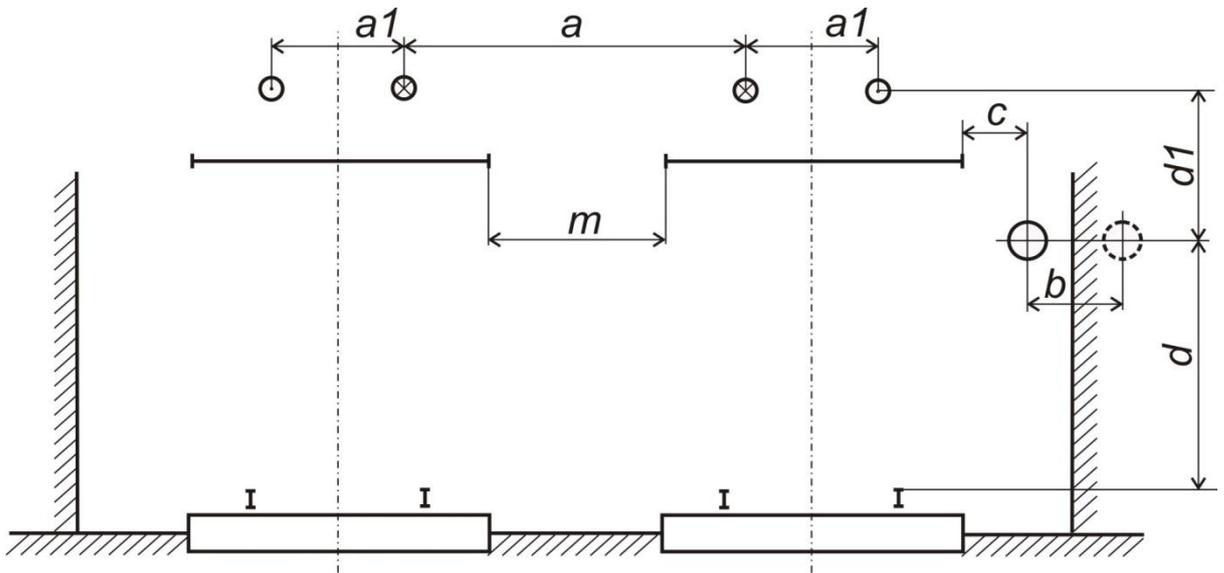


Рис. 5.10. Расположение тяговой сети и постороннего проводника в сечении двухпутевой выработки

Однако эти допущения справедливы только для частного случая конкретной выработки. При изменении габаритов подвижного состава и профиля выработки последние два параметра не являются постоянными. Зазор между подвижными составами  $m$  также непостоянен и изменяется в широких пределах. Расстояние между соседними кабелями тяговой сети  $a_1$  также зависит от зазора между составами. Поэтому для расчета искробезопасного шага транспозиции в двухпутевой выработке с учетом переходных процессов в тяговой сети требуется не только применение зависимостей для случая высокой частоты, но и учет возможных изменений в расположении тяговых сетей и посторонних проводников в подземной выработке.

Учитывая, что расстояние между кабелями тяговой сети  $a$  равно 0,4 м [68, 70], для взаимной индуктивности тяговой сети и участка постороннего контура получено выражение:

$$M = l\mu_0 \frac{1}{4\pi} \ln \left\{ \frac{((c + 0,47)^2 + d_1^2) \cdot ((m + c + 2,21)^2 + d_1^2) \cdot ((0,87 + c + b)^2 + d_1^2)}{((1,81 + b + c + m)^2 + d_1^2)} \right\} \times \left\{ \frac{1}{[(c + b + 0,47)^2 + d_1^2] \cdot [(c + 0,87)^2 + d_1^2] \cdot [(1,81 + m + c)^2 + d_1^2] \cdot [2,21 + b + c + m]^2 + d_1^2} \right\}, \quad (5.16)$$

которое может быть использовано при построении алгоритмов расчета искробезопасного шага транспозиции для двухпутевой и однопутевой выработок, отличающихся выражением для определения  $M$ . Изменения числовых коэффициентов в выражении (5.16) позволяют применить его при любом взаимном расположении кабелей тяговой сети и посторонних проводников.

Если полагать, что расстояние от горизонтальной оси постороннего проводника до крепи равно 0,1 м, то значение  $b$  при этом равно 0,2 м. При таком значении параметра  $b$  значение напряжения, наводимого на участке постороннего контура тяговой сетью, не превышает 2,8 В, ток короткого замыкания при этом не превышает искробезопасный. Изменение значения параметра  $b$  в пределах от 0,2 м до 0,35 м не дает увеличения напряжения на участке постороннего контура выше указанных значений и увеличения тока короткого замыкания до значения, превышающего искробезопасный ток. Использование выражения (5.16) при расчете искробезопасного шага транспозиции позволяет варьировать значение параметра  $b$  в соответствии с конструкцией выработки, материалами и толщиной крепи, а также внешним диаметром брони кабеля постороннего проводника и его расположением в выработке. При расчетах целесообразно использовать значение  $b$ , соответствующее наиболее опасному состоянию, т.е. наибольшее из возможных в реальных выработках.

Адекватность полученных результатов доказывает сравнение полученных расчетным путем значений взаимной индуктивности контура "броня кабеля-земля" и экспериментально определенных в [68] значений. Результаты сравнения приведены в табл. 5.4.

Таблица 5.4. К определению взаимной индуктивности контуров

Длина контура, м	Зазор с, м	Расстояние $d_1$ , м	Взаимная индуктивность, мкГ		Погрешность $e$ , %
			расч.	экспер.	
100	0,8	0,4	4,39	4,35	0,9
80	2,0	0,2	1,81	1,9	4,2
60	0,9	0,3	2,75	2,49	10,4

Из таблицы 5.4 следует, что относительная погрешность расчетов не выше 10,4 %, что допустимо для инженерной практики.

### **Выводы**

1. Учитывая критические требования тягового преобразователя к качеству напряжения, предложены новые зависимости для оценки уровня показателей несинусоидальности на различных ступенях распределения электроэнергии угольной шахты, которые отличаются от существующих использованием приближенного подхода к расчетам. При этом требуется минимум исходной информации, времени для вычислений и обеспечивается допустимая для инженерных расчетов погрешность.

2. Специфический характер протекания переходных процессов при пуске ТПЧ бесконтактного транспорта позволил выделить область научных вопросов, не решенных ранее, касающихся электромагнитной совместимости и искробезопасности посторонних контуров. Учитывая то, что ТПЧ сам является источником помех и одновременно питается от несинусоидального напряжения, необходимо оценивать общий уровень дополнительных потерь в системе электроснабжения. Поэтому проанализированы значения электромагнитных помех с учетом особенностей подземных шахтных сетей – низкий уровень мощности короткого замыкания в схеме питания подземных участков, который обуславливает высокие значения дополнительных потерь мощности от ВГ в трансформаторах и кабельных линиях.

3. Разработанный подход анализа электромагнитной совместимости позволит определить уровень электромагнитных помех (искажение синусоидальности) в любой точке системы электроснабжения, учитывая коэффициенты передачи. Отличительной особенностью полученных коэффициентов является их приведение к 1 км кабельной линии, что позволяет утверждать об универсальности полученных зависимостей. Полученные значения коэффициентов для условий, характерных для подземных электрических сетей находятся в диапазоне 0,1...0,3.

4. Для анализа режимных параметров ТПЧ как элемента системы электроснабжения предложено учитывать комплексную обобщенную нагрузку узла (на примере угольных шахт). Такая постановка задачи моделирования позволяет выявить взаимосвязи режимных параметров энергосистемы, линейной нагрузки и мощных нелинейных нагрузок ТПЧ и оценить уровни электромагнитной совместимости узлов нагрузки. Путем математического моделирования установлены зоны годового электромагнитного ущерба от несинусоидальности напряжения в основном электрооборудовании (3,5...8,0 тыс. грн. для трансформаторов передвижных подстанций мощностью соответственно 160...630 кВ·А и 0,3...1,8 тыс. грн. для асинхронных двигателей мощностью соответственно 10...100 кВт).

5. Проведена оценка искробезопасности посторонних проводников в переходных режимах тяговой сети, что является одним из условий надежной работы комплекса транспорта с индукционной передачей энергии. Отличительной особенностью данного исследования является учет взаимосвязей режима работы тяговой сети и расположения проводников в выработке с характеристиками искробезопасных зон, что позволило получить новый результат в виде искробезопасных зон для двухпутевой выработки, которые расширены по сравнению с однопутевой как в установившемся, так и в переходном режимах.

6. Сравнительная оценка искробезопасности посторонних электрических цепей для пускового и установившегося режимов свидетельствует о достаточности учета параметров только установившегося режима сети при расчете искробезопасного шага транспозиции, что доказывает необходимость точного определения искробезопасного шага транспозиции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена научная задача, заключающаяся в установлении закономерностей изменения режимов тяговой сети бесконтактного транспорта и обосновании выбора требуемых параметров режимов электропотребления с учетом состояния питающей сети и тягового преобразователя.

Проведенные в диссертационной работе исследования позволяют сформулировать следующие обобщающие выводы:

1. Эксплуатация шахтного бесконтактного транспорта сопряжена с частыми пусками ТПЧ, что сильно влияет на энергетические показатели в целом. Поэтому в работе разработан комплексный подход повышения энергетической эффективности и безопасности работы тяговой сети транспорта с индукционной передачей энергии, основанный на формировании оптимальных моделей энергетических процессов при пуске тягового преобразователя частоты.

2. Математическая модель расчета переходных процессов в тяговой сети повышенной частоты разработана с применением современных программных средств и является развитием работ по моделированию высокочастотных скомпенсированных сетей. Особенностью разработанной модели является учет активной проводимости кабельной линии. Это позволило более критично определить допущения при моделировании и повысить точность результатов, что особенно важно при разработке рациональных режимов пуска сети и исключения перенапряжений.

3. Путем перебора различных сочетаний параметров тяговой сети и пусковых режимов ТПЧ установлено, что наиболее вероятно появление опасных перенапряжений при пуске тягового преобразователя на первом компенсационном пункте. Это объясняется особенностями изменения волнового сопротивления при зарядке тяговой линии, что учтено при обосновании уровней начального тока при пуске и времени его нарастания.

4. Точность определения расстояния между пунктами компенсации при проектировании тяговой сети влияет на резонансную настройку емкости конденсаторов и индуктивности линии и зависит не только от собственных удельных параметров, но и от ЭДС, которая индуцируется в сеть при прохождении электровоза. Поэтому уточненные модели расчета допустимого расстояния между пунктами компенсации разработаны с учетом наибольшей добавки напряжения при прохождении состава пунктов компенсации, что позволяет отслеживать режим напряжения в динамике движения электровоза.

5. Учитывая особенности скомпенсированной тяговой сети транспорта, определены безаварийные режимы работы конденсаторов компенсационных пунктов. Установленные зависимости позволяют определить рациональное расстояние между компенсационными пунктами и оценить значение потерь реактивной мощности, а значит косвенно и значение энергоэффективности от числа вышедших из строя конденсаторов. Это решает проблему максимального выравнивания напряжения вдоль тяговой сети и исключает режимы перенапряжений на пунктах компенсации.

6. Учитывая недостаточно исследованные пусковые режимы ТПЧ, сформулирована и решена задача поиска рационального режима относительно пускового тока преобразователя и времени его нарастания, в результате решения которой обеспечивается минимальное значение тока на допустимом интервале. При разработке рациональных режимов тяговой сети учитывались различные сочетания начальных условий и определено, что с изменением длины линии характер изменения скорости нарастания первичного тока изменяется. При этом получены новые области допустимых значений скорости нарастания выходного тока преобразователя, которые учитывают длину тяговой сети.

7. Преобразователь частоты как электроприемник с нелинейной вольт-амперной характеристикой является источником помех, кроме того необходимым условием его надежной работы есть обеспечение достаточно высокого качества напряжения питающей сети. Для проверки допустимости

подключения ТПЧ в данной точке системы электроснабжения, рассматривается оценочный способ определения показателей электромагнитной совместимости тягового преобразователя с электрической сетью, который состоит в использовании коэффициента передачи помехи. Отличительной особенностью предложенных коэффициентов является их приведение к длине кабельной линии. Полученные значения дополнительных потерь активной мощности от высших гармоник приведены к 100 метрам кабеля, что является основой решения практических задач.

8. Сравнение полученных моделей с данными эксперимента доказывают адекватность результатов при учете как формы кривой тока и напряжения, так и отклонения полученных значений от известных в контрольных точках. Контрольными параметрами являются значения напряжений в начале линии и местах установки компенсационных пунктов, а также значения тока в начале и в конце линии. Значения относительной погрешности для рассмотренных моментов времени находятся в пределах 1,14 – 9,8 %.

9. Реализация предложенных режимов пуска преобразователя приводит к повышению энергетической эффективности и снижению опасных перенапряжений. Экономический эффект, который обусловлен снижением потерь активной мощности в тяговой сети, составил 35 тыс. грн. в год для одного ТПЧ при использовании специальных режимов пуска преобразователя. При этом снижение потерь - это один из положительных результатов. Основным эффектом заключается в рациональном распределении напряжения вдоль тяговой сети и компенсационных пунктов, что исключает выход из строя конденсаторов и пробой изоляции кабельной линии.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники / Атабеков Г.И. – М.: Энергия, 1970. – 592с. (ч.1. Линейные электрические цепи. Изд. 4-е).
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники / Бессонов Л.А. – М.: «Высш. школа», 1973. – 752 с с илл.
3. Батищев Д.И. Поисквые методы оптимального проектирования / Д.И. Батищев. – М.: Сов. радио, 1975. – 184 с.
4. Бикфорд Дж. П. Основы теории перенапряжений в электрических сетях / Бикфорд Дж. П., Мюлинс Н., Рид Дж. Р.; пер. с англ. под ред. А.А. Обуха. – М.: Энергоиздат, 1981. – 165с.
5. Бунько В.А. Повышение безопасности рудничной электровозной откатки / В.А.Бунько, С.А.Волотковский, Г.Г. Пивняк– М.: Недра, 1978. – 200с.
6. Вейсс К.Г. Исследование и разработка тиристорных преобразователей шахтных бесконтактных электровозов: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.09.03 / К.Г. Вейсс. – Киев, 1975. -25с.
7. Гончаров В.Б. Защита от токов утечки в тяговой сети бесконтактного электрического транспорта: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03, 05.26.01 / Гончаров Владимир Борисович. – Днепропетровск, 1984. -186с.
8. Демидович Б.П. Численные методы анализа. / Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. – М.: Наука, 1967. – 368с.
9. Демирчян К.С. Сравнительный анализ методов численного интегрирования при расчете переходных процессов в электрических цепях / К.С. Демирчян, В.М. Волков, Е.Н. Карташев // Электричество. – 1976. -№9. – С.47-51.
10. Довгань В.П. Улучшение тяговых и энергетических характеристик рудничных бесконтактных электровозов: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Довгань Василий Павлович. – Днепропетровск, 1982. – 241с.
11. Долгов Б.Г. Повышение эффективности управления рудничными бесконтактными электровозами: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.09.03 / Б.Г. Долгов. – Киев, 1975. -23с.

12. Електромагнітна сумісність у системах електропостачання: Підручник / [І.В. Жежеленко, А.К. Шидловський, Г.Г. Півняк, Ю.Л. Саєнко]. – Д.:Нац. гірнич. ун-т, 2009. – 319 с.: іл.
13. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий, 6-е издание / Жежеленко И.В. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 331 с.
14. Жиров Л.В. Исследование электроснабжения рудничной бесконтактной электровозной откатки: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Жиров Леонид Васильевич. – ДГИ, 1973.
15. Захарин В.С. Анализ переходных процессов в нагруженных цепях с распределенными параметрами / В.С. Захарин, З.Г. Каганов, А.В. Киселев, Л.С. Медведева // Электричество. – 1984. - №8. – С.30.
16. Зражевский Ю.М. Обоснование параметров установившегося режима тяговой сети рудничного бесконтактного электрического транспорта: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Зражевский Юлий Михайлович. – ДГИ, 1989.
17. Зражевский Ю.М. Повышение точности расчета пускового режима системы электроснабжения бесконтактного электрического транспорта/ Ю.М. Зражевский, А.Я. Рыбалко, Е.И. Хованская // Кибернетика электрических систем. Электроснабжение промышленных предприятий: Тез. Докл. XII сессии Всесоюзного научного семинара. 19-22 ноября 1991г., г. Гомель. – Гомель, 1991. – С.109-110.
18. Зражевский Ю.М. Сравнительный анализ методов расчета переходных процессов в тяговой сети бесконтактного электрического транспорта / Ю.М. Зражевский, Е.И. Хованская // Горная электромеханика и автоматика. Респ. межвед. науч.-техн. сб.- Киев, 1991.- Вып.58.- С.34-37.
19. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий / [И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саєнко, Т.К. Бараненко, А.В. Горпинич, В.В. Нестерович]; Под ред. И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2007.– 296 с.

20. Калантаров П.Л. Расчет индуктивностей / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 488с (Справочная книга. – 3-е изд. перераб. и доп).
21. Караев Р.И. Переходные процессы в линиях большой протяженности / Караев Р.И. – М.: Госэнергоиздат, 1969. – 136с.
22. Караев Р.М. Дифференциально-разностные уравнения волнового процесса в длинной линии / Р.М. Караев, Ю.А. Лямец // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1973. -№3. – С.132-138.
23. Караев Р.М. О применении разностных уравнений длинной линии / Р.М. Караев, Ю.А. Лямец // Электричество, 1972.-№11.-С.28-36.
24. Кики Р.Л. Принятие решений при многих критериях: Предпочтение и замещение / Р.Л. Кики, Х.Л. Райфа. – М.: Радио и связь, 1981. – 215 с.
25. Ковалев А.Р. Анализ пускового режима тяговой сети в комплексе транспорта с индуктивной передачей энергии / А.Р. Ковалев, Хованская Е.И. // Гірничя електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб.- 2000.- Вип. 64.- С.30-34.
26. Конторович М.И. Операционное исчисление и нестационарные явления в электрических цепях / Конторович М.И. – М.: Гостехиздат, 1955. – 228с.
27. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1984. – 832с.
28. Коровкин Н.В. К вопросу о расчете переходных процессов в длинных линиях на основе метода синтетических схем / Н.В. Коровкин, Е.Е. Селина // Расчет и оптимизация параметров электромагнитных устройств и систем управления электроприводом. – Омск, 1985. – С.27-30.
29. Коровкин Н.В. Метод интегрирования уравнений цепей с переменной структурой / Н.В. Коровкин // Электромагнитные процессы в электрических машинах и аппаратах: Межвуз. тематич. сб. науч. тр. – Омск, 1986. – С.86-89.
30. Коровкин Н.В. О выборе метода численного интегрирования уравнений электрических схем с переменной структурой / Н.В. Коровкин //

Исследования в области теоретических основ электротехники и инженерной электрофизики / Межвуз. сб. науч. тр. Ивановский ГУ. – Иваново, 1982. – С.61-63.

31. Коровкин Н.В. Расчет на ЭВМ электрических цепей с распределенными параметрами, зависящими от частоты / Н.В. Коровкин, Е.Е. Селина // Сложные электромагнитные поля и электрические цепи. – Уфа, 1982. – С.81-89.

32. Коровкин Н.В. Эффективный алгоритм численного моделирования волнового процесса в электроэнергетических устройствах / Н.В. Коровкин, Е.Е. Селина // Электромагнитные процессы в электрических машинах и аппаратах. – Омск, 1983. – С.103-109.

33. Кулиев И.А. Аналитическое и численное исследование цепей с распределенными параметрами, содержащих нелинейные элементы / И.А. Кулиев, А.М. Гусейнов // Междунар. симп. по теор. электротехнике. Москва, 23-28 сент., 1985. Т.2: Тез. докл.- М., 1985.-С.73-74.

34. Лысенко А.Г. Оптимизация пускового режима тяговой сети транспорта с индуктивной передачей энергии / А.Г. Лысенко, Т.И. Хованская // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.–техн. зб. –2006. –Вип.77 –С. 57-61.

35. Лысенко А.Г. Перспективы энергосбережения для комплекса рудничного бесконтактного транспорта путем оптимизации параметров режимов его электрооборудования / А.Г. Лысенко // Техническая электродинамика. – №3. – Киев, 2004.

36. Матиев Д.И. Контроль изоляции и защитное ограничение токов утечки в цепях рудничного бесконтактного электровоза: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Матиев Дмитрий Ильич. – Днепропетровск, 1984. -212с.

37. Нейман Л.Р. Теоретические основы электротехники: В 2-х т. Учебник для вузов. Том 2. – 3-е изд. перераб. и доп. / Л.Р. Нейман, К.С. Демирчкян –Л.: Энергоиздат, 1981. – 416с.

38. Новаш В.И. Вычислительный эксперимент в исследовании электромагнитных переходных процессов в линиях электропередачи / В.И. Новаш, М.И. Стрелюк, Л.Н. Свита // Изв. вузов, Энергетика. – 1976. - №10. – С.8-13.

39. Ногин В.Д. Основы теории оптимизации / В.Д. Ногин, К.О. Протодяконов, И.И. Евлампиев. – М.: Высш. шк., 1986. – 384 с.
40. Особливі режими електричних мереж / [Півняк Г.Г., Шидловский А.К., Кігель Г.А., Рыбалко А.Я., Хованська О.І.]. – Дніпропетровськ: НГА України, 2004. – 375 с.
41. Папаика Ю.А. Анализ режимов напряжения тяговой сети высокочастотного шахтного транспорта / Ю.А. Папаика, А.Г. Лысенко // Гірнична електромеханіка та автоматика . – Вип.89. – Дніпропетровськ, 2012. – С.9-13.
42. Петренко А.И. Табличные методы моделирования электрических схем на ЭЦВМ / А.И. Петренко, А.И. Власов, А.П. Тимченко.– К.: Вища школа, 1977.- 188с.
43. Пивняк Г.Г. Анализ нагрузки тягового преобразователя частоты с учетом волновых свойств линии / Г.Г. Пивняк, Ю.М. Зражевский // Преобразование параметров электрической энергии: Сб. науч. статей. – К., 1976. – Вып.2. – С.98-102.
44. Пивняк Г.Г. Выбор шага интегрирования при расчете режимов тяговой сети транспорта с индуктивной передачей энергии / Г.Г. Пивняк, Е.И. Хованская // Горная электромеханика и автоматика. Респ. межвед. науч.-техн. сб. – Киев, 1991. – Вып.59. – С.71-76.
45. Пивняк Г.Г. Задачи моделирования режимов работы тяговой сети транспорта с индуктивной передачей энергии / Г.Г. Пивняк, Ю.М. Зражевский, Е.И. Хованская // Технічна термодинаміка. Тематичний випуск „Проблеми сучасної електротехніки”. Ч.7, 2004.- С112-116.
46. Пивняк Г.Г. Математическое моделирование процессов пуска рудничных бесконтактных электровозов / Г.Г. Пивняк, В.П. Довгань, Б.Г.Долгов. – АНУССР, Ин-т электродинамики – К., 1972. – 10с.
47. Пивняк Г.Г. Разработка и исследование тиристорных преобразователей в комплексе оборудования для бесконтактного электрического транспорта угольных шахт. – Дис. ... докт. техн. наук: 05.09.03 / Пивняк Геннадий Григорьевич. – Киев, 1981. -403с.

48. Поспелов Г.Е. Потери мощности и энергии в электрических сетях / Г.Е. Поспелов, Н.М. Сыч; Под ред. Г.Е. Поспелова –М.: Энергоатомиздат, 1981. -216 с.
49. Пресманн И.И. Исследование и разработка тяговых тиристорных преобразователей частоты для шахтной бесконтактной электровозной откатки: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец.05.09.03. – Днепропетровск, 1977. -25с.
50. Применение цифровых вычислительных машин в электроэнергетике: Учеб. пособие для вузов / [О.В. Щербачев, А.Н. Зейлингер, К.П. Кадомская и др.] – Л.: Энергия. Ленинградское отделение, 1980. – 240с.
51. Проблемы численного моделирования процессов в электрических цепях / [Демирчян К.С., Ракитинский Ю.В., Бутырин П.А. и др.] // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1982. - №2. – С.94-114.
52. Расчет переходных процессов в электрических системах на ЭЦВМ / [А.И. Долгинов, Л.С. Левина, А.И. Ступель, В.С. Шатин]. – М.: Энергия, 1968. – 103с.
53. Рогоза М.В. Силовые схемы тиристорного привода рудничных бесконтактных электровозов: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Рогоза Михаил Валентинович.– Днепропетровск, 1983. -257с.
54. Розенфельд В.Е. Высокочастотный бесконтактный электрический транспорт / В.Е. Розенфельд, Н.А. Староскольский. – М.: «Транспорт», 1975 – 208с.
55. Рыбалко А.Я. Использование разностных схем при расчетах тяговой сети бесконтактного электрического транспорта / А.Я. Рыбалко, Ю.М. Зражевский, Е.И. Хованская // Разработка методов и средств экономии электроэнергии в электрических системах и системах электроснабжения транспорта [Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. 13-15 ноября 1990 г., г. Днепропетровск]. – Днепропетровск, 1990. – С.273-274.
56. Рыбалко А.Я. Обеспечение безопасности электрооборудования рудничного бесконтактного электровоза: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Рыбалко Анатолий Яковлевич. – Днепропетровск, 1983. -242с.

57. Рыбалко А.Я. Оценка технологических параметров подземного транспорта при использовании электровозов / А.Я. Рыбалко, Е.И. Хованская // Горная электромеханика и автоматика: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – Киев, 1990. – Вып.57. – С.62-66.
58. Самарский А.А. Теория разностных схем.– М.: Наука, 1983. – 616 с.
59. Самородов Г.И. Расчет переходных процессов в длинной линии / Г.И. Самородов, В.К. Халевин // Параметры и переходные режимы дальних электропередач [Тр. Сибирского научно-исследовательского института энергетики]. – Новосибирск, 1966. – С. 22-37.
60. Свистельник О.А. Параметры и условия обеспечения искробезопасности посторонних контуров при эксплуатации рудничного бесконтактного электровозного транспорта: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Свистельник О.А. – Днепропетровск, 1981. - 252с.
61. Сергиенко И.В. Математические модели и методы решения задач дискретной оптимизации / Сергиенко И.В. – К. : Изд-во "Наук. думка", 1985. – 384 с.
62. Скляр Ю.С. Анализ переходных процессов в длинных линиях постоянного тока методами теории дифференциально-разностных уравнений / Ю.С. Скляр, С.И. Минкин // Изв. вузов. Электромеханика. – 1975. - №7. – С.687-694.
63. Сыромятников В.И. Математическое моделирование процессов в длинной линии на АВМ / В.И. Сыромятников// Тр. ВНИИЭ. – 1974. –Вып.46. – С.100-106.
64. Транспорт с индуктивной передачей энергии для угольных шахт / Г.Г. Пивняк, И.П. Ремизов, С.А. Саратикянц и др. [под ред. Г.Г. Пивняка].- М.: Недра, 1990.-245с.
65. Хаяси С. Волны в линиях электропередачи / Пер. с англ.: Под общ. ред. В.Ю. Ломоносова. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. -343с.
66. Хованская Е.И. Анализ параметров тяговой сети транспорта с индуктивной передачей энергии при изменении ее нагрузки / Е.И. Хованская,

И.А. Шедловский // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб.- 2002.- Вип. 69.- С.147-150.

67. Хованская Е.И. Влияние взаимной индуктивности тяговой сети и посторонних контуров на режимы электропотребления транспорта с индуктивной передачей энергии/ Е.И. Хованская // Эффективность и качество электроснабжения промышленных предприятий. Сб. трудов 3-й Междунар. науч. конф. (15-17 сентября 1994г., Украина, г. Мариуполь). – Мариуполь, 1994. – С.277-279.

68. Хованская Е.И. Искробезопасность электрических цепей при откатке бесконтактными электровозами / Е.И. Хованская, Ю.А. Папаика, А.Г. Лысенко // Науковий вісник НГУ. – №4, 2012. – С.128-132.

69. Хованская Е.И. Исследование влияния переходных процессов в тяговой сети на электроснабжение бесконтактного транспорта / Е.И. Хованская // Повышение эффективности и качества электроснабжения: Тез. докл. науч.-техн. конф.( 22-25 мая 1990г., г. Мариуполь). – Мариуполь, 1990. –С.83-85.

70. Хованская Е.И. Обоснование параметров переходных режимов тяговой сети транспорта с индуктивной передачей энергии: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Хованская Елена Игоревна.-Днепропетровск, 1997.-148с.

71. Хованская Е.И. Особенности моделирования нестационарной нагрузки тяговой сети транспорта с индуктивной передачей энергии / Е.И. Хованская, А.Г. Лысенко // Науковий вісник НГУ. – №3. – Днепропетровск, 2004. – С.84-86.

72. Хованская Е.И. Оценка параметров режима нагруженной тяговой сети транспорта с индуктивной передачей энергии при изменении протяженности выработки / Е.И. Хованская, И.А. Шедловский // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб.- 2002.- Вип. 69.- С.144-147.

73. Хованська О.І. Вплив вихідних параметрів тягового перетворювача частоти на витрати потужності в мережі / О.І. Хованська, О.Г. Лисенко // Гірнична електромеханіка та автоматика. – №74. – Дніпропетровськ, 2005. – С.9-13.

74. Хованська О.І. Дослідження енергетичних показників пускового режиму тягової мережі / О.І. Хованська, О.Г. Лисенко // Технічна

електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. – Частина 4. – Київ, 2006. – С.39-42.

75. Худолеев Г.В. Исследование и разработка устройств повышения качества электроснабжения рудничной бесконтактной электровозной откатки: дис....канд. техн. наук: 05.09.03 / Худолеев В.Г. – Днепропетровск, 1977. -244 с.

76. Чашко М.В. Бесконтактное электроснабжение транспортных машин будущего / М.В. Чашко, Г.В. Демченко, В.А. Цыганков // Донбасс-2020: перспективы развития глазами молодых ученых / Материалы I Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Донецк, ДонНТУ. –2002. –С.440-444.

77. Шедловский И.А. Средства поиска повреждений компенсирующих устройств тяговой сети шахтного бесконтактного транспорта повышенной частоты: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Шедловский Игорь Анатольевич – 181с.

78. Электромагнитная совместимость потребителей [текст]: Э45 моногр. / [И.В. Жежеленко, А.К. Шидловский, Г.Г. Пивняк и др.]. – М.: Машиностроение, 2012. – 350 с.

79. Khovanskaya Ye. Rational modes of traction network operation of transport with inductive power transfer in the coal industry / Ye. Khovanskaya, A. Lysenko // CRC Press/Balkema – Taylor & Francis Group: Power Engineering Control and Information Technologies in Geotechnical Systems. – Leiden, The Netherlands, 2013 annual publication. – P. 79-84.

80. Pivnyak G. Traction and energy characteristics of no-contact electric mining locomotives with AC current thyristor converters / G. Pivnyak, M. Rogoza, Yu. Papaika & A. Lysenko // CRC Press/Balkema – Taylor & Francis Group: Power Engineering Control and Information Technologies in Geotechnical Systems. – Leiden, The Netherlands, 2015 annual publication. – P. 1-6.

81. Pivnyak G.G. Normalization of voltage quality as the way to ensure energy saving in power supply systems / G.G. Pivnyak, I.V. Zhezhelenko, Y.A. Papaika CRC Press/Balkema – Taylor & Francis Group: Power Engineering Control and Information Technologies in Geotechnical Systems. – Leiden, The Netherlands, 2015 annual publication. – P. 11-18.

## ***ПРИЛОЖЕНИЯ***

**Программа расчета режимов тяговой сети**

Основной шаг интегрирования, м     H0 := 100  
 Шаг аппроксимации, м                H1 := 0.001  
 Длина линии, м                        L := 1000  
 Количество КП                         NC := 4

Таблица ёмкостей конденсаторов (первый столбец) и длин участков (второй столбец):

R0 := 0.515    C0 := 0.0019    L0 := 0.02    G0 := 0.105 · 10<sup>-3</sup>

LineParam :=

500	200
505	200
600	200
500	200
405	200

ErrorMes1 := "Attention! The user defined data is incorrect!"  
 ErrorMes2 := "NC cant be less than one."

```
H := error(ErrorMes1) if (2·H1 + H0) > min(submatrix(LineParam,0,NC,1,1))
error(ErrorMes2) if NC < 1
_NS ← NC + 1
_j ← 0
for _i ∈ 0.._NS - 1
  _G ← (H1 H1) if _i = 0
       (H1 0) if _i = _NS - 1
       (H1 H1) otherwise
  if _G0,0 ≠ 0
    _H_j ← -G0,0
    _j ← _j + 1
  _K ← floor[ (LineParam_i,1 - (-G0,0 + -G0,1)) / H0 ]
  for n ∈ 1.._K
    _H_j ← H0
    _j ← _j + 1
  _PLS ← LineParam_i,1 - _K·H0 - (-G0,0 + -G0,1)
  if _PLS ≠ 0
    _H_j ← _PLS
    _j ← _j + 1
  if _G0,1 ≠ 0
    _H_j ← -G0,1
    _j ← _j + 1
_H
```

H<sup>T</sup> =

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	1·10 <sup>-3</sup>	100	99.998	1·10 <sup>-3</sup>	1·10 <sup>-3</sup>	100	99.998	...

Число элементов в массиве шагов интегрирования H: NO := length(H) NO = 19

===== Нагруженный режим =====

```

K1 := | _j ← 0
      | _j ← 0
      | while _j < NO - 1
      |   if H[_j] = H1
      |     | K1[_j] ← _j
      |     | _j ← _j + 1
      |     | _j ← _j + 1
      |     | _j ← _j + 1
      | _K1
      |
      | Подпрограмма формирования массива номеров сечений, в
      | которых установлены компенсационные пункты (КП).
      |
      | K1T = (0 3 7 11 15)
    
```

2. Задание шага по времени.

$\tau := 0.000001$       Число шагов по времени:  $\frac{T}{\tau} := 50$

$z_{вх0} := \sqrt{L_0 \cdot C_0}$        $f := 5000$        $\omega := 2 \cdot \pi \cdot f$

Задаём моменты времени с учётом шага по времени.       $t_1 := -\tau$        $t_2 := 0$        $t_3 := \tau$

3. Задание начальных условий.

$T_{p1} := 2 \cdot \tau$        $T_{p2} := 5 \cdot \tau$        $I_{p1} := 40$        $I_{p2} := 150$

```

I_0(curr_time) := | error("Unexpected time value") if curr_time < 0
                  | linterp( [ (0, I_p1), (T_p1, I_p1) ], curr_time) if 0 ≤ curr_time ≤ T_p1
                  | linterp( [ (T_p1, I_p1), (T_p2, I_p2) ], curr_time) if T_p1 < curr_time ≤ T_p2
                  | I_p2 otherwise
    
```

4. Вычисление массива коэффициентов системы уравнений

$\gamma := \left( \frac{\tau}{H} \right)$        $\gamma^T =$

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	...

$b := \left( 2 \cdot \gamma^2 - \tau \cdot R_0 \cdot C_0 + 2 \cdot L_0 \cdot C_0 + G_0 \right)$

$b^T =$

	0	1	2	3	4	5
0	$1.83 \cdot 10^{-4}$	$1.81 \cdot 10^{-4}$	$1.81 \cdot 10^{-4}$	$1.83 \cdot 10^{-4}$	$1.83 \cdot 10^{-4}$	...

$a := \left( 2 \cdot \gamma^2 + \tau \cdot R_0 \cdot C_0 + 2 \cdot L_0 \cdot C_0 + G_0 \right)$

$$a^T = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \hline 0 & 1.83 \cdot 10^{-4} & 1.81 \cdot 10^{-4} & 1.81 \cdot 10^{-4} & 1.83 \cdot 10^{-4} & 1.83 \cdot 10^{-4} & 1.81 \cdot 10^{-4} & \dots \\ \hline \end{array}$$

$$d := 4 \cdot L_0 \cdot C_0 \quad d = 1.52 \times 10^{-4}$$

6.7.8. Подпрограмма расчёта  $b_3$ ,  $F_k$ , прогоночных коэффициентов.

```
in_array(seeking_value, array) ≡ | for _i ∈ 0..length(array) - 1
                                | return 1 if array[_i] = seeking_value
                                | return 0
```

$$F1(x, x_k, h) \equiv \begin{cases} 0 & \text{if } x < x_k - h \\ 1 & \text{if } x \geq x_k - h \end{cases} \quad F2(x, x_k) \equiv \begin{cases} 0 & \text{if } x < x_k \\ 1 & \text{if } x \geq x_k \end{cases} \quad F3(x, x_k, h) \equiv \begin{cases} 0 & \text{if } x < x_k + h \\ 1 & \text{if } x \geq x_k + h \end{cases}$$

```
seek_closest_kp(number, kp_array) ≡ | if kp_array[0] = 0
                                    | | _tmp0 ← -2
                                    | | kp_array ← stack(_tmp, kp_array)
                                    | for _i ∈ 0, 1..length(kp_array) - 2
                                    | | return kp_array[_i+1] if kp_array[_i] + 2 ≤ number ≤ kp_array[_i+1] + 1
                                    | -1
```

$$FC := \left( \frac{\frac{\tau}{2}}{\text{LineParam} \langle i \rangle} \right) \quad FC^T = (2.5 \times 10^{-9} \quad 2.5 \times 10^{-9} \quad 2.5 \times 10^{-9} \quad 2.5 \times 10^{-9} \quad 2.5 \times 10^{-9})$$

```
Fk(U1, U2, UK) := | for _i ∈ 1..NO - 2
                  | | _cond ← (in_array(_i, K1) = 1) + (in_array(_i + 1, K1) = 1) + (in_array(_i - 1, K1) = 1)
                  | | _b3[_i] ← 0
                  | | if _cond
                  | | | seek_closest_kp(_i, K1)
                  | | | | _xk ← ∑_{j=0} H_j
                  | | | | _x ← ∑_{j=0}^i H_j
                  | | | | | _topindex ← | max(K1) if _i > max(K1)
                  | | | | | | _i otherwise
                  | | | | | | _b3[_i] ← 2 · (γ[_i])2 · ∑_{n=0}^_topindex [UK_n · (F1(_x, _xk, H[_i]) - 2 · F2(_x, _xk) + F3(_x, _xk, H[_i]))]
                  | | | | | | _Fk[_i] ← (γ[_i])2 · (U1[_i-1] + U1[_i+1]) - b[_i] · U1[_i] + d · U2[_i] + _b3[_i]
                  | | | | | | | Fk
```

$Fk_0$  не вычисляется, поскольку уже вычислено значение  $U_{0,2}$ .

$\alpha_0, \beta_0$  не вычисляются, поскольку уже вычислено значение  $U_{0,2}$ .

```

mU :=
  -zBX,1 ←  $\sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$ 
  -zBX,1 ← 6.16
  for _i ∈ 0, 1.. NO - 1
    -Ui,0 ← -13.5
    -Ui,1 ← 0
    -Ii,1 ← 0
  for _i ∈ 0, 1.. length(K1) - 1
    -UKK1_i,0 ← 0
  for _t ∈ 2, 3.. T
    -_ctime ← (_t - 1) · τ
    -I0,_t ←  $\sqrt{2} \cdot I_0(\text{isStaticMode}) \cdot \sin[\omega \cdot (-_ctime)]$ 
    -DZ ←  $\frac{|-U_{0,_t-1} - U_{0,_t-2}|}{|-I_{0,_t} - I_{0,_t-1}|}$ 
    -zBX,_t ← -zBX,_t-1 - DZ · _ctime
    -zBX,_t ← 6.16
    for _i ∈ 0, 1.. length(K1) - 1
      -_index ← K1_i
      -UK_index,_t-1 ←  $\begin{cases} -U_{\_index,_t-1} & \text{if } (_t = 3) \\ -UK_{\_index,_t-2} + FC\_i \cdot (-I_{\_index,_t-1} + -I_{\_index,_t-2}) & \text{otherwise} \end{cases}$ 
      -U0,_t ← -zBX,_t · -I0,_t
      for _i ∈ 1.. NO - 2
        -xmultiplier ← 20
        -topindex ← seek_closest_kp(_i, K1)
        -b3,_i ←  $\begin{cases} 2 \cdot (\gamma\_i)^2 \cdot \left[ \sum_{n=0}^{\text{topindex}} (-UK_{n,_t-1}) \right] & \text{if } (\text{in\_array}(\_i + 1, K1) = 1) \\ -2 \cdot (\gamma\_i)^2 \cdot \left[ \sum_{n=0}^{\text{topindex}} (-UK_{n,_t-1}) \right] & \text{if } (\text{in\_array}(\_i, K1) = 1) \\ 0 & \text{if } (\text{in\_array}(\_i - 1, K1) = 1) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$ 
        -Fk,_i ←  $(\gamma\_i)^2 \cdot (-U_{\_i-1,_t-2} + -U_{\_i+1,_t-2}) - b\_i \cdot U_{\_i,_t-2} + d \cdot U_{\_i,_t-1} + -b3\_i$ 
        -FK(_i) ← -Fk
        -α1 ←  $\frac{(\gamma_1)^2}{a_1}$ 
        -β1 ←  $-U_{0,_t} + \frac{-F_{k_1}}{(\gamma_1)^2}$ 

```

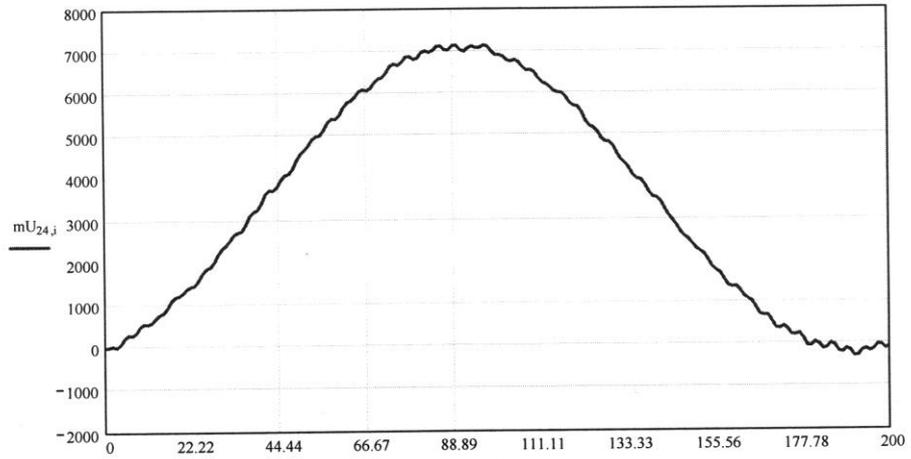
```

for _j ∈ 2,3..NO - 2
  -α_j ← (γ_j)^2 / (a_j - (γ_j)^2 * -α_{j-1})
  -β_j ← -α_{j-1} * -β_{j-1} + (-Fk_j) / (γ_j)^2
-U_{NO-1,t} ← 0
for _j ∈ NO - 2, NO - 3..1
  -U_{j,t} ← -α_j * (-β_j + -U_{j+1,t})
for _j ∈ 1,2..NO - 1
  -I_{j,t} ← -I_{j-1,t} - H_j * C_0 * ((-U_{j,t} - -U_{j,t-1}) / τ)
  -I_{j,t} ← -I_{0,t}
-U

```

	0	1	2	3	4	5	6
0	-13.5	0	41.045	82.05	122.974	163.777	204.418
1	-13.5	0	39.135	82.019	126.496	168.816	208.681
2	-13.5	0	37.359	82.008	129.892	173.824	213.056
3	-13.5	0	35.707	82.035	133.18	178.773	217.514
4	-13.5	0	34.171	82.117	136.378	183.638	222.028
5	-13.5	0	32.743	82.271	139.501	188.394	226.57
6	-13.5	0	31.415	82.513	142.564	193.02	231.116
7	-13.5	0	30.181	82.857	145.58	197.493	235.645
8	-13.5	0	29.034	83.319	148.562	201.792	240.136
9	-13.5	0	27.967	83.913	151.52	205.896	244.574
10	-13.5	0	26.977	84.653	154.463	209.786	248.944
11	-13.5	0	26.057	85.553	157.399	213.44	253.238
12	-13.5	0	25.202	86.628	160.334	216.837	257.447
13	-13.5	0	24.408	87.891	163.273	219.956	261.571
14	-13.5	0	23.672	89.359	166.216	222.773	265.61
15	-13.5	0	22.988	91.046	169.165	225.265	269.573
16	-13.5	0	22.354	92.968	172.117	227.407	273.472
17	-13.5	0	21.766	95.142	175.068	229.173	277.324

$i := 0, 1..T - 1$



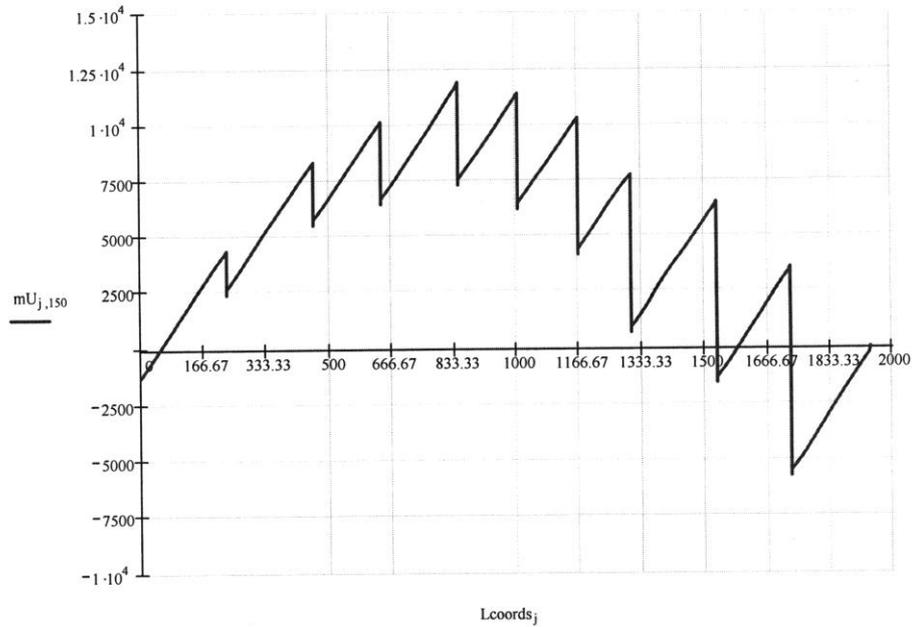
Lcoords :=  $\left[ \begin{array}{l} \text{for } i \in 0, 1.. \text{length}(H) - 1 \\ \quad \_l_i \leftarrow \sum_{k=0}^i H_k \\ \_l \end{array} \right.$

Lcoords<sup>T</sup> =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	0	1 · 10 <sup>-3</sup>	10.001	20.001	30.001	40.001	50.001	60.001	70.001	80.001	90.001

$j := 0, 1..NO - 1$

t=const



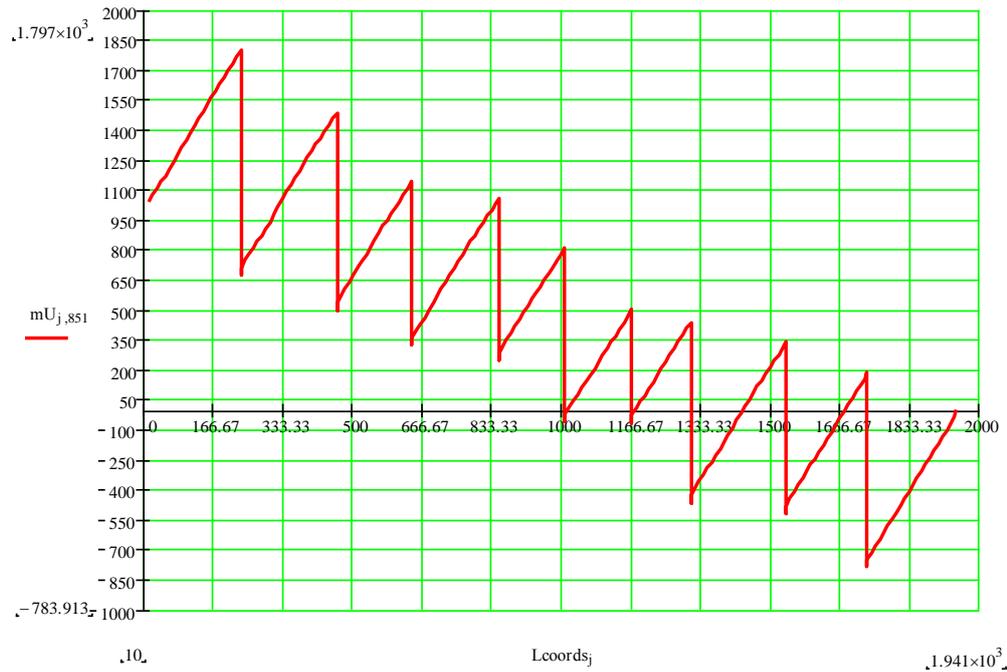


Рис. Б.1. Зависимость напряжения в сечениях тяговой сети длиной 1941 м (9 КП) для момента времени  $t=850$  мкс в установившемся режиме

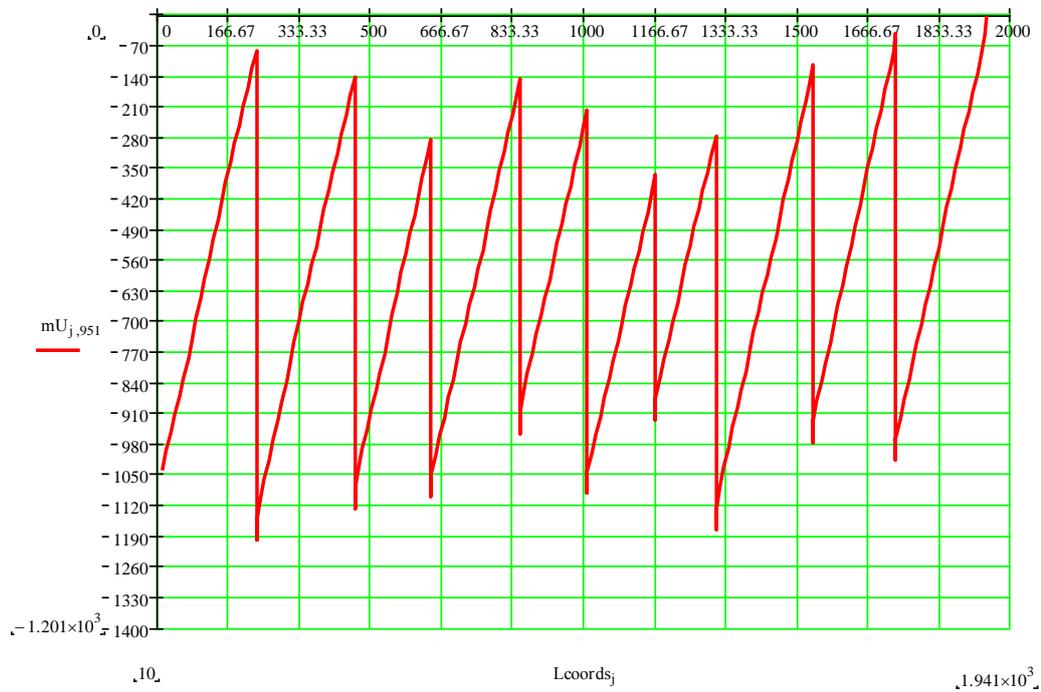


Рис. Б.2. Зависимость напряжения в сечениях тяговой сети длиной 1941 м (9 КП) для момента времени  $t=950$  мкс в установившемся режиме

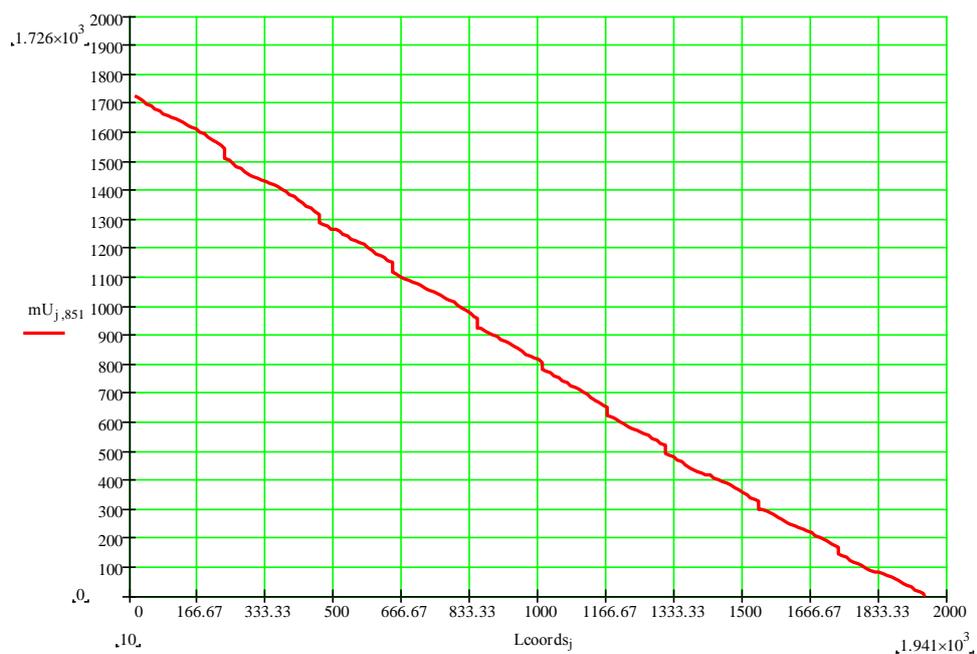


Рис. Б.3. Зависимость напряжения в сечениях тяговой сети длиной 1941 м (9 КП) для момента времени  $t=850$  мкс в пусковом режиме

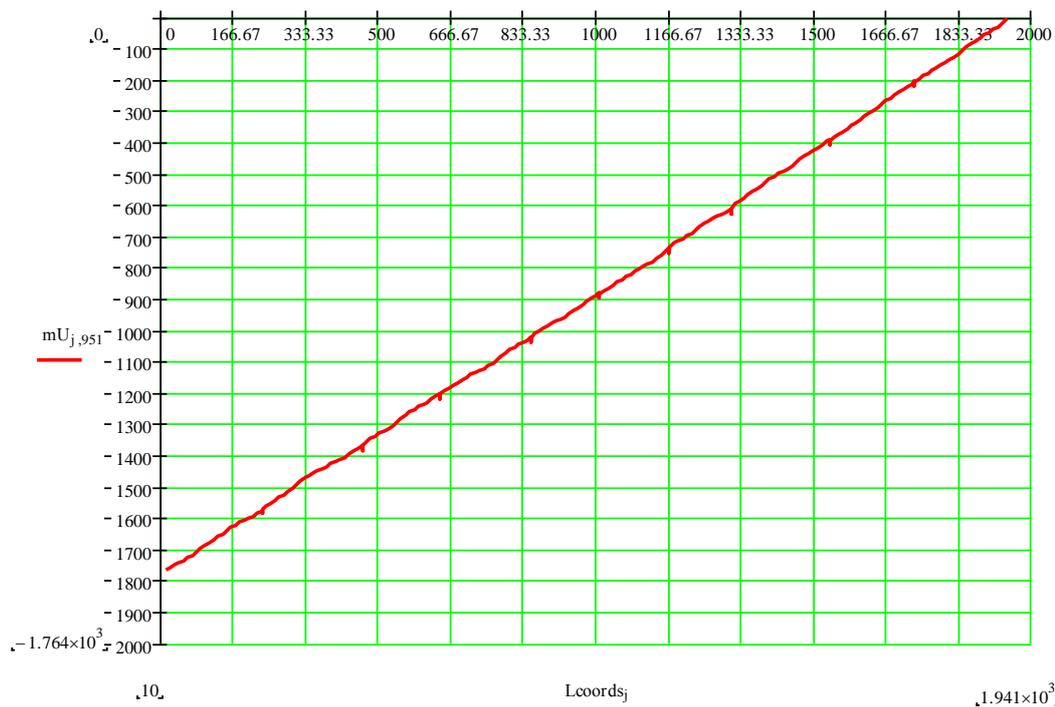


Рис. Б.4. Зависимость напряжения в сечениях тяговой сети длиной 1941 м (9 КП) для момента времени  $t=950$  мкс в пусковом режиме

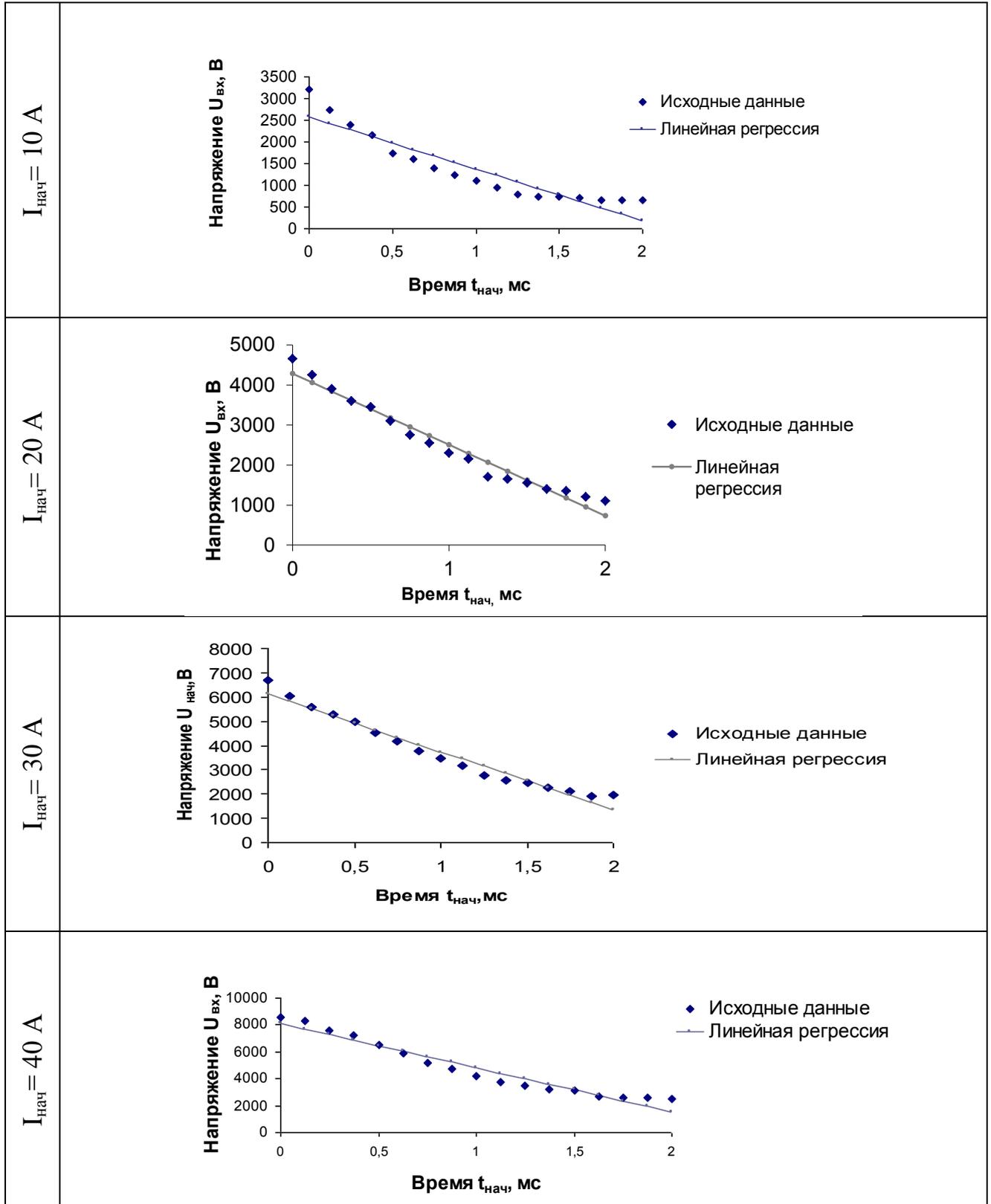


Рис. В.1. Зависимости напряжения  $U_{\text{вх}}$  от времени  $t_{\text{нач}}$  при линейной регрессии

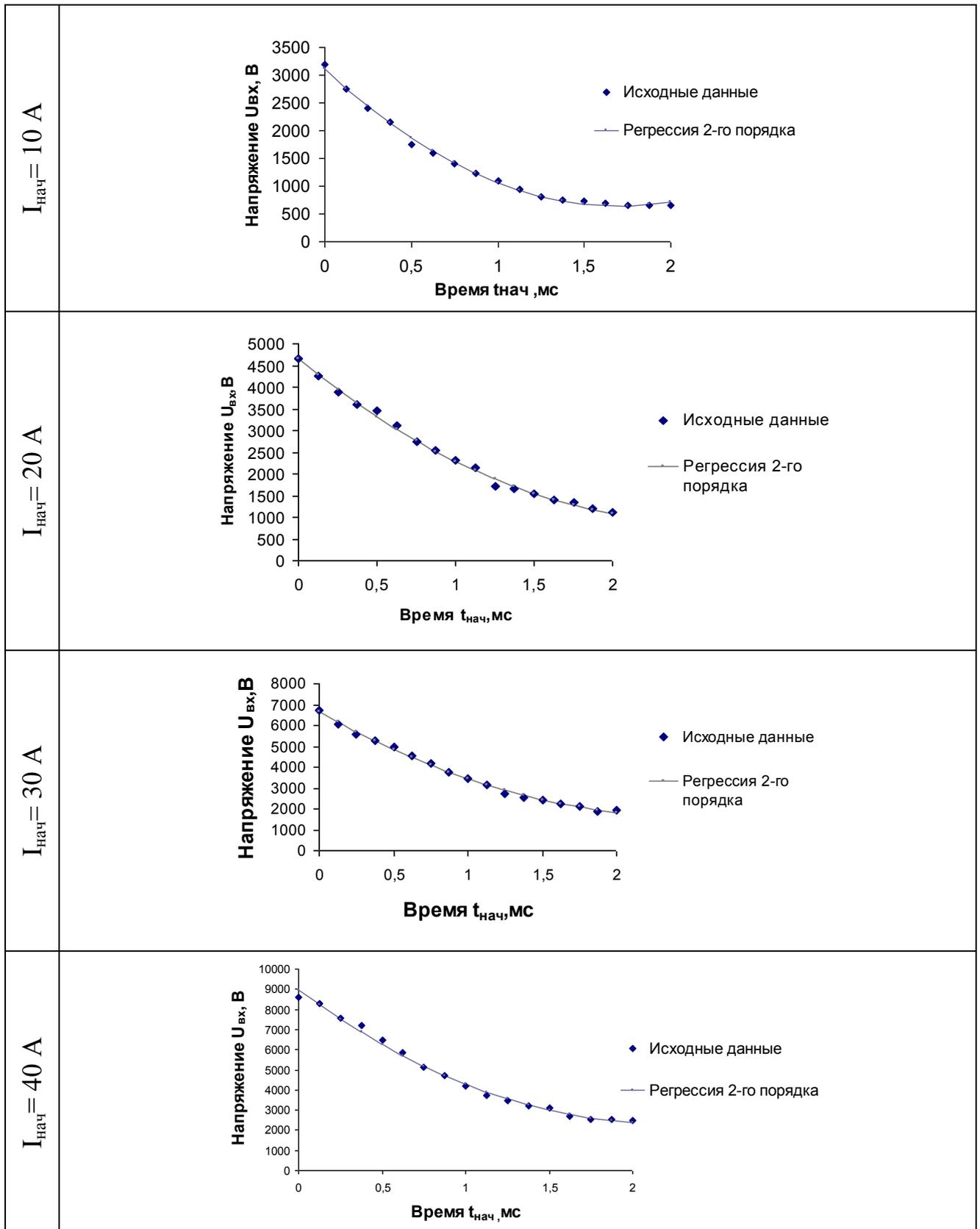


Рис. В.2. Зависимости напряжения  $U_{\text{вх}}$  от времени  $t_{\text{нач}}$  при полиномиальной регрессии 2-го порядка

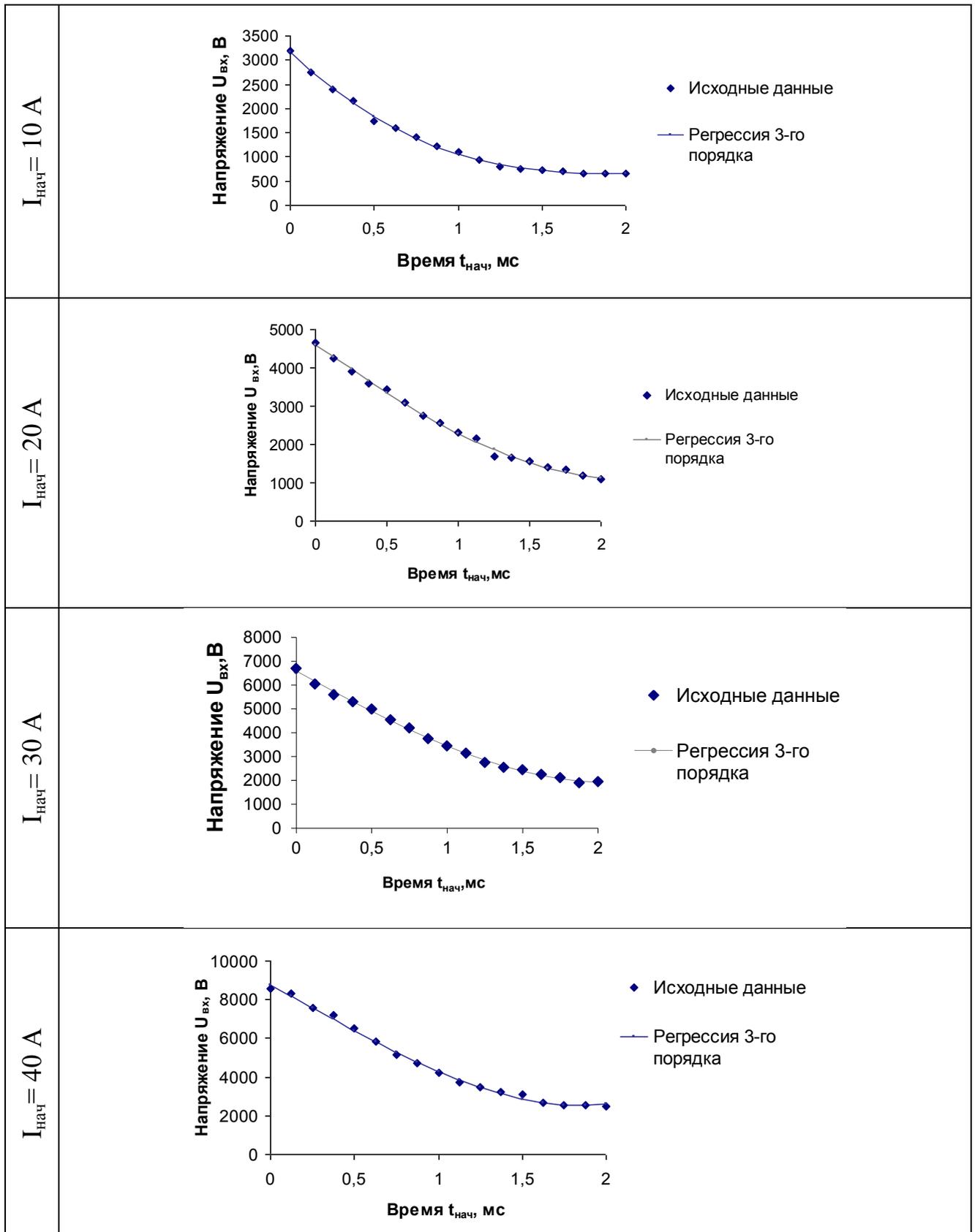


Рис. В.3. Зависимости напряжения  $U_{\text{вх}}$  от времени  $t_{\text{нач}}$  при полиномиальной регрессии 3-го порядка

## Приложение Г

"УТВЕРЖДАЮ"

Директор «НПЦ ДТЭК»

П.П. Корж

2015 г.

**ПРОТОКОЛ**

об использовании результатов исследований

Лысенко Александры Геннадиевны

выполненных в диссертационной работе

на тему: "Оптимизация параметров пускового режима тяговой сети транспорта с индуктивной передачей энергии"

Настоящий протокол свидетельствует о том, что в НПЦ ДТЭК приняты к использованию результаты научных разработок в виде нового способа оптимизации пусковых режимов шахтного транспорта с индуктивной передачей энергии, отображающий научные и практические результаты кандидатской диссертационной работы Лысенко А.Г. и учитывающий:

- возможность определения алгоритма пуска тягового преобразователя частоты на ненагруженную тяговую сеть при минимальных потерях мощности;
- методику определения допустимого шага между пунктами компенсации, в которой учитывается не только собственные параметры тяговой линии, но и ЭДС, индуцируемая в сеть при движении электровоза.

Руководитель департамента  
по проектированию

В.Н. Недолужко

**"УТВЕРЖДАЮ"**

Генеральный директор

ПАО «ДТЭК Павлоградуголь»

С.А. Воронин

2015 г.



### **ПРОТОКОЛ**

об использовании результатов исследований  
Лысенко Александры Геннадиевны  
выполненных в диссертационной работе

на тему: "Оптимизация параметров пускового режима тяговой сети транспорта  
с индуктивной передачей энергии"

Настоящий протокол составлен о том, что в «ДТЭК Павлоградуголь» рассмотрены и считаются перспективными к использованию результаты научных разработок в виде нового способа определения потерь мощности в пусковых режимах тягового преобразователя частоты для бесконтактного транспорта с индуктивной передачей энергии, отображающий научные и практические результаты кандидатской диссертационной работы Лысенко А.Г. Особенно необходимо отметить следующие результаты:

- возможность определения режима напряжения тяговой сети с целью исключения перенапряжений и обеспечения энергоэффективных режимов работы;

- зависимости определения допустимого шага между пунктами компенсации, в которых учитывается вносимое электровозом сопротивление.

Применение предложенных режимов пуска тягового преобразователя частоты имеет практическую ценность и обеспечит минимум потерь мощности и исключит выход из строя электрооборудования от перенапряжений.