

## Оглавление

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	5
ВВЕДЕНИЕ .....	6
1. КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЛИНИЯХ ПИТАНИЯ СЦБ И ПРОДОЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ВЛИЯНИЯ ТЯГОВОЙ СЕТИ.....	13
1.1. Влияние наведенных напряжений на качество электроэнергии линий СЦБ и ПЭ.....	13
1.2. Эффекты влияния тяговой сети на трехфазные линии СЦБ и ПЭ напряжением 6-10 кВ .....	14
1.3. Эффекты влияния тяговой сети на линии ПР и ДПР .....	17
1.4. Качество электроэнергии потребителей, подключенных к линии ДПР.....	21
Выводы .....	23
2. МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ.....	24
2.1. Общие принципы моделирования.....	24
2.2. Программный комплекс имитационного моделирования.....	26
2.3. Сопоставление экспериментальных измерений и имитационного моделирования программным комплексом.....	34
Выводы .....	43
3. АНАЛИЗ СХЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УСТРОЙСТВ СЦБ .....	44
3.1. Схемы электроснабжения объектов СЦБ .....	44
3.2. Моделирование режимов типовых систем электроснабжения объектов СЦБ.....	50
3.2.1. Схемы питания объектов СЦБ .....	50
3.2.2. Описание расчетной схемы .....	52
3.2.3. Подключение нагрузок на фазные напряжения.....	55
3.2.4. Подключение нагрузок СЦБ на фазные напряжения при разных расстояниях от питающей подстанции.....	59
3.2.5. Подключение нагрузок на фазные напряжения. Однофазные замыкания на землю в линии, подключенной к районной обмотке тягового трансформатора.....	60
3.2.6. Влияние транспозиции ЛЭП при подключении нагрузок.....	63
на фазные напряжения .....	63
3.2.7. Влияние нагрузок СЦБ, подключенных на фазные напряжения.....	65
3.2.8. Влияние тяговой нагрузки на показатели качества электроэнергии на шинах 0,4 кВ СЦБ при подключении нагрузок СЦБ на фазные напряжения .....	67
3.2.9. Влияние характера нагрузок СЦБ, подключенных на фазные напряжения.....	68
3.2.10. Подключение нагрузок СЦБ на линейные напряжения.....	70
3.2.11. Имитационное моделирование движения поездов.....	73
3.2.12. Моделирование несинусоидальных режимов.....	81
3.3. Моделирование режимов систем электроснабжения объектов СЦБ, расположенных на реальном участке ЖД .....	84
3.3.1. Характеристика системы электроснабжения железной дороги.....	84
3.3.2. Модели элементов системы электроснабжения .....	86
3.3.3. Описание расчетной схемы ПК Fazonord .....	87
3.3.4. Описание имитационной модели.....	89
3.3.5. Показатели качества электроэнергии в линиях ДПР и СЦБ при встречно-консольном питании МПЗ.....	91
3.3.6. Показатели качества электроэнергии в линиях ДПР и СЦБ при консольном питании линий.....	96
3.3.7. Показатели качества электроэнергии в линиях ДПР и СЦБ при консольном питании линий и тяговой сети .....	101

3.4. Моделирование режимов специализированных систем электроснабжения .....	106
3.4.1. Тяговые сети с отсасывающими трансформаторами .....	106
3.4.2. Применение ЛЭП с заземленной фазой .....	113
Выводы .....	115
<b>4. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ СЦБ .....</b>	<b>121</b>
4.1. Симметрирующие трансформаторы .....	121
4.2. Регулируемые источники реактивной мощности.....	122
4.3. Активные кондиционеры гармоник.....	127
4.4. Управляемые симметрирующие устройства по схеме Штейнмеца.....	136
4.5. Анализ возможностей применения схемы Штейнмеца и АКГ для нормализации показателей качества при консольном питании линий ДПР и СЦБ на реальной схеме электроснабжения участка железной дороги .....	149
4.6. Резервное электроснабжение объектов железнодорожного транспорта на базе устройств по схеме Штейнмеца.....	156
Выводы .....	165
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>167</b>

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АВР – автоматическое включение резерва  
АКГ – активный кондиционер гармоник  
АПВ – автоматическое повторное включение  
ВЛ – воздушная линия  
ДПР – два провода – рельс  
ИрГУПС – Иркутский государственный университет путей сообщения  
ИРМ – источник реактивной мощности  
ЛЭП – линия электропередачи  
КЗ – короткое замыкание  
КРМ – компенсация реактивной мощности  
КС – контактная сеть  
МПЗ – межподстанционная зона  
ОТ – отсасывающие трансформаторы  
ОП – обратный провод  
ОТ ОП – отсасывающие трансформаторы, включенные в обратный провод  
ОТ РР – отсасывающие трансформаторы, включенные в рассечку рельсов  
ПК – программный комплекс  
ПКЭ – показатели качества электроэнергии  
ППС – пункт параллельного соединения  
ПС – подстанция  
ПСк – пост секционирования  
ПЭ – продольное электроснабжение  
РО районная обмотка  
РП – распределительный пункт  
СВЭ – система внешнего электроснабжения  
СКРМ – средство компенсации реактивной мощности  
СТЭ – система тягового электроснабжения  
СЦБ – сигнализация, централизация, блокировка  
СУ – симметрирующее устройство  
СЭЖД – система электроснабжения железной дороги  
СЭС – система электроснабжения  
ТН – трансформатор напряжения  
ТП – тяговая подстанция  
ТС – тяговая сеть  
ТТ – тяговый трансформатор  
ТСН – трансформатор собственных нужд  
ТСЦБ – трансформатор питания линии автоблокировки  
ТТ – тяговый трансформатор  
ФКУ – фильтрокомпенсирующее устройство  
ЭДС – электродвижущая сила  
ЭПС – электроподвижной состав  
ЭЧЭ – тяговая подстанция  
ЭЭС – электроэнергетическая система

## ВВЕДЕНИЕ

Электроснабжение электрифицированных железных дорог [117] осуществляется от систем внешнего электроснабжения через тяговые подстанции. От них получают питание устройства электрической тяги и нетяговые железнодорожные потребители, к которым относятся ремонтные заводы, депо, мастерские, железнодорожные станции и т. д. [1, 2, 19 – 21]. В данную группу объектов также включаются устройства сигнализации, централизации и блокировки, являющиеся важнейшим средством регулирования движения поездов, обеспечивающим увеличение пропускной и провозной способностей железных дорог. Устройства СЦБ являются потребителями первой категории, электроснабжение которых должно осуществляться от двух независимых источников питания – основного и резервного [106].

Согласно статистическим данным по сети дорог России, ежегодно из-за нарушений электроснабжения сигнальных точек происходит вынужденная задержка движения нескольких тысяч поездов [4]. Это свидетельствует об актуальности задач повышения надежности СЭС объектов СЦБ, а также улучшения качества электроэнергии.

Исследованию систем электроснабжения и электропитания объектов СЦБ посвящено значительное количество работ, часть из которых представлена в библиографическом списке. Общие вопросы, связанные с построением таких СЭС, рассмотрены в работах [7, 10, 18, 36, 64, 69, 78, 81–83, 85, 87, 88, 90 – 92, 94 – 102, 104 – 105, 109 – 110, 113 – 115, 119 – 129, 133, 136]. Решению задач повышения надежности СЭС СЦБ посвящены статьи [5, 17, 11, 24, 25, 68, 74, 84]. Вопросы моделирования СЭС СЦБ рассмотрены в публикациях [3, 16, 26 – 35, 37, 93, 103, 130]. Решения задач повышения энергоэффективности и качества электроэнергии [139 – 141] в системах электроснабжения СЦБ представлены в работах [8, 9, 22, 38, 41, 65/ 70 – 72, 86, 89, 108, 131 – 132, 142, 149].

Как и все воздушные линии электропередачи, ЛЭП автоблокировки и продольного электроснабжения отключаются максимальной токовой защитой при коротких замыканиях. При грозовых перенапряжениях, схлестываниях проводов под действием ветра КЗ могут устраняться после от-

ключения линии. В таких случаях автоматическое повторное включение ЛЭП позволяет восстановить нормальную работу.

Высоковольтные линии автоблокировки и продольного электропитания делятся на отдельные участки, каждый из которых обеспечивается двусторонним питанием. В нормальном режиме линия подключена к основному источнику энергии. Второй пункт питания, расположенный на другом конце линии, включается в работу при отключении основного источника. В этих условиях быстродействующее автоматическое включение второго пункта позволяет избежать перерывов в подаче энергии. Устройства АВР устанавливаются на пунктах питания автоблокировки. Схемы АВР могут отличаться конструктивно, но все они действуют однократно, вне зависимости от причин исчезновения напряжения в линии.

Объекты СЦБ как потребители первой категории должны получать питание от двух независимых источников энергии через взаимно резервируемые линии. Основное питание объекты СЦБ получают от специальных трехфазных линий автоблокировки (ВЛ СЦБ) напряжением 6 (10) кВ с изолированной нейтралью. Резервное питание на участках, электрифицированных на постоянном токе, а также на неэлектрифицированных участках выполняется, как правило, от линий продольного электропитания напряжением 6 или 10 кВ. На участках, электрифицированных на переменном токе, резервное электроснабжение осуществляется по линиям 25 кВ «два провода – рельс». В отдельных случаях резервирование СЭС СЦБ выполняют от прилегающих низковольтных ЛЭП.

Источниками питания перечисленных линий являются тяговые и специальные трансформаторные подстанции, сооружаемые для питания линий автоблокировки и продольного электроснабжения, причем на электрифицированных участках трансформаторные подстанции используют в качестве резервных источников питания, а на неэлектрифицированных – в качестве основных.

Применяют три схемы питания линий автоблокировки: односторонняя (консольная), встречно-консольная и двусторонняя (параллельная). При консольном питании напряжение в линию подается от одной из тяговых подстанций. В случае исчезновения напряжения на ТП питание линии

автоматически переводится на смежную подстанцию устройством АВР. Таким же образом при схеме консольного питания подается напряжение и в линию ПЭ 6...10 кВ. С целью повышения надежности консольную схему питания выполняют так, чтобы линии основного и резервного питания подключались к разным подстанциям. Поэтому на каждой ТП ВЛ СЦБ включают для питания фидерных зон в одном направлении, а ЛЭП ПЭ для их питания во встречном направлении. Такая схема, однако, имеет существенный недостаток, заключающийся в ухудшении качества электроэнергии по сравнению со встречно-консольной схемой.

При схеме встречно-консольного питания в середине межподстанционной зоны на ВЛ СЦБ делается раздел и напряжение на каждый участок линии подается от одной из смежных подстанций. По сравнению с консольной эта схема более совершенна, так как протяженность питаемых участков линии уменьшается вдвое и улучшается режим напряжения в линии. При повреждениях отключается только половина участка ВЛ СЦБ между подстанциями.

При двусторонней схеме линия автоблокировки питается от двух смежных подстанций. В этом случае минимизируются потери напряжения и мощности в ЛЭП, а при аварийном отключении одной подстанции линия продолжает получать питание от другой. Серьезным недостатком такой схемы являются уравнительные токи, которые определяются векторной разностью напряжения на питающих подстанциях и могут достигать значений, при которых срабатывают токовые защиты линий. Кроме того, при отключении одной из подстанций или существенном изменении напряжения на ней ток подпитки по ВЛ СЦБ и ПЭ 6 (10) кВ резко возрастает и вызывает срабатывание защит и отключение линий на смежных подстанциях.

Подключение ВЛ СЦБ к пунктам питания должно производиться так, чтобы они не имели гальванической связи с другими высоковольтными линиями, в том числе с ЛЭП продольного электроснабжения. Это обусловлено требованием ограничения тока однофазного замыкания на землю, оказывающего дестабилизирующее влияние на линии связи и рельсовые цепи автоблокировки. Кроме того, ограничение протяженности разветвленных гальванически связанных электрических сетей облегчает работу защи-

ты от двухфазных коротких замыканий в наиболее удаленных от источников питания точках. Поэтому ВЛ СЦБ подключают, как правило, к шинам 220 или 380 В собственных нужд тяговых или трансформаторных подстанций. Присоединение осуществляют через повышающий трансформатор ТСЦБ. От ТСЦБ обычно питаются два фидера ВЛ СЦБ. К недостаткам такой схемы следует отнести взаимные влияния при ненормальных режимах, так как короткие замыкания и просадки напряжения, возникающие на одном фидере, влияют на нормальную работу смежного фидера этой же подстанции.

Схемы секционирования ВЛ СЦБ и ПЭ должны обеспечивать возможность выполнения ремонта на линии. Место и количество секционных разъединителей на ЛЭП зависят от способов резервирования, а также от местных условий. При наличии линии продольного электроснабжения, используемой для резервирования питания, разъединители ВЛ СЦБ, как правило, устанавливают в горловинах станций и по концам кабельных вставок; при этом их оборудуют приводами с дистанционным управлением. При отсутствии высоковольтных линий резервного питания разъединители устанавливают с двух сторон от линейных трансформаторов, что обеспечивает возможность выполнения ремонтных работ на отдельных точках без снятия напряжения с линии в целом.

Фидеры ВЛ СЦБ подключаются к РУ 6-10 кВ через масляные выключатели. Для защиты трансформатора предусматриваются предохранители. Контроль напряжения и питание цепей защиты от замыканий на землю осуществляется трансформаторами напряжения. Устройства СЦБ получают основное питание от ВЛ СЦБ, а резервное – от линий продольного электроснабжения.

Одной из важнейших причин, определяющих качество электроснабжения устройств СЦБ, является электромагнитное влияние тяговой сети на смежные линии, которое можно разделить на три вида [41]:

- электрическое, появляющееся за счет емкостной связи между контактной сетью и смежной линией;
- магнитное, обусловленное наведением ЭДС в контуре «смежный провод – земля» переменным магнитным полем тока контактной сети;

– гальваническое, возникающее за счет токов, протекающих в земле, на объектах, имеющих заземления; этот вид влияния наиболее существенно сказывается при электрификации на постоянном токе и приводит к электрокоррозии подземных металлических объектов.

Наличие электрического и магнитного влияний требует повышенных мер безопасности при работах со снятием напряжения и заземлением. Этим, однако, перечень негативных эффектов, связанных с влиянием на смежные линии, не ограничивается. Электрическое влияние на смежные линии, расположенные на опорах контактной сети, настолько велико, что требует применения технических решений для снижения неблагоприятных изменений режимов их работы.

Для обнаружения однофазных замыканий на землю необходимо уменьшить электрическое влияние на смежные линии, в противном случае сигнализация будет постоянно срабатывать от напряжений электрического влияния. В итоге необнаруженные однофазные замыкания будут приводить к двухфазным КЗ и к недопустимым перерывам в электроснабжении потребителей.

Фактор электромагнитного влияния особенно сильно проявляется на несимметричных линиях ДПР и приводит к появлению дополнительных напряжений на ЛЭП СЦБ. Из-за зависимости наведенных напряжений магнитного влияния от частоты имеет место существенный рост несинусоидальности двух напряжений «провод – земля» линии ДПР. Так как наведенное напряжение магнитного влияния определяется площадью, охватываемой контурами соответствующей пары проводов, подобный эффект в трехфазных линиях 6/10 кВ проявляется гораздо меньше ввиду близкого расположения проводов друг к другу.

На железных дорогах переменного тока для питания тяговых и нетяговых нагрузок, включая устройства СЦБ, обычно используется один и тот же трехфазный трансформатор. Поэтому однофазные нелинейные тяговые нагрузки вызывают большие отклонения, значительную несимметрию и несинусоидальность напряжений на линиях, питающих объекты СЦБ. Эти проблемы наиболее выражены на ЛЭП ДПР, которые напрямую подклю-

чены к тяговым шинам с нагрузкой, быстро и существенно изменяющейся во времени.

Учету перечисленных факторов должно уделяться первостепенное внимание при анализе качества электрической энергии основного и резервного питания устройств СЦБ. В монографии представлены результаты компьютерных исследований проблем качества электроэнергии в СЭС объектов СЦБ на примерах СТЭ типовых и реальных схем питания участков железных дорог переменного тока. Моделирование проводилось с помощью программного комплекса Fazonord-APC [111], описание которого приведено в работе [53]. Для моделирования использовались следующие исходные данные по системам электроснабжения:

- схемы внешнего электроснабжения с указанием марок проводов и длин линий;
- типы тяговых подстанций по фазировке подключения к внешней сети;
- параметры трансформаторов;
- размеры движения поездов;
- параметры контактной сети, а также смежных линий основного и резервного питания СЦБ;
- профили пути участков железной дороги.

С помощью программного комплекса Fazonord-APC проведен анализ факторов, определяющих качество электроэнергии на шинах 0,4 кВ подстанций СЦБ.

Монография включает четыре раздела, в первом из которых рассмотрены вопросы влияния тяговой сети на смежные линии и качество электроэнергии. Эффекты электрического и магнитного влияний на линии СЦБ и ПЭ рассмотрены отдельно; ситуация с несинусоидальностью напряжений линии ПЭ представлена с теоретическими количественными оценками.

Во втором разделе кратко описан использованный для моделирования программный комплекс Fazonord-APC, позволяющий производить расчеты режимов объединенной однофазно-трехфазной сети на основной частоте и частотах высших гармоник, генерируемых электровозами пере-

менного тока; при этом моделируется движение поездов, создающих меняющиеся во времени и перемещающиеся в пространстве нагрузки тяговой сети.

В третьем разделе представлены результаты расчетов показателей качества электроэнергии в линиях СЦБ и ПЭ при учете тяговой нагрузки и влияния ТС на эти линии в различных вариантах подключения нагрузок СЦБ. Рассмотрены аварийные и несинусоидальные режимы. Приведены результаты имитационного моделирования реального участка железной дороги.

Четвертый раздел содержит анализ возможностей улучшения качества электроэнергии линий СЦБ и ПЭ применением симметрирующих трансформаторов, регулируемых источников реактивной мощности, активных кондиционеров гармоник и управляемых элементов по схеме Штейнмеца.

Исследования, результаты которых представлены в монографии, выполнены при финансовой поддержке по гранту государственного задания Минобрнауки России на тему «Повышение качества электрической энергии и электромагнитной безопасности в системах электроснабжения железных дорог, оснащенных устройствами Smart Grid, путем применения методов и средств математического моделирования на основе фазных координат».

# **1. КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЛИНИЯХ ПИТАНИЯ СЦБ И ПРОДОЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ВЛИЯНИЯ ТЯГОВОЙ СЕТИ**

## **1.1. Влияние наведенных напряжений на качество электроэнергии линий СЦБ и ПЭ**

Линии 6(10) кВ, питающие объекты СЦБ, могут монтироваться на опорах контактной сети, а также на отдельных опорах, расположенных на расстояниях 20...30 м от трассы железной дороги; при этом электромагнитные влияния тяговой сети существенно изменяют такие показатели качества электроэнергии как отклонения, несимметрия и несинусоидальность напряжений [6, 23, 41, 39, 40, 66, 67, 118, 134, 135, 141]. Надо заметить, что влияние тяговой сети 2×25 кВ на смежные линии значительно ниже по сравнению с системой 25 кВ.

Как правило, железнодорожные сети, осуществляющие электропитание объектов СЦБ и других нетяговых потребителей, выполненные на напряжениях 6...10 кВ, имеют изолированные нейтрали. В нормальном режиме таких сетей гальваническая связь с землей осуществляется только через первичную обмотку трансформаторов напряжения. Их токи холостого хода не превышают 10 миллиампер и потому напряжений электрического влияния практически не снижают. Наводимые на трехпроводные ЛЭП напряжения влияния образуют нулевую последовательность, препятствуя нормальной работе защит от однофазных замыканий на землю. Элементами тяговой сети, определяющими электрическое влияние, являются контактные сети и усиливающие провода.

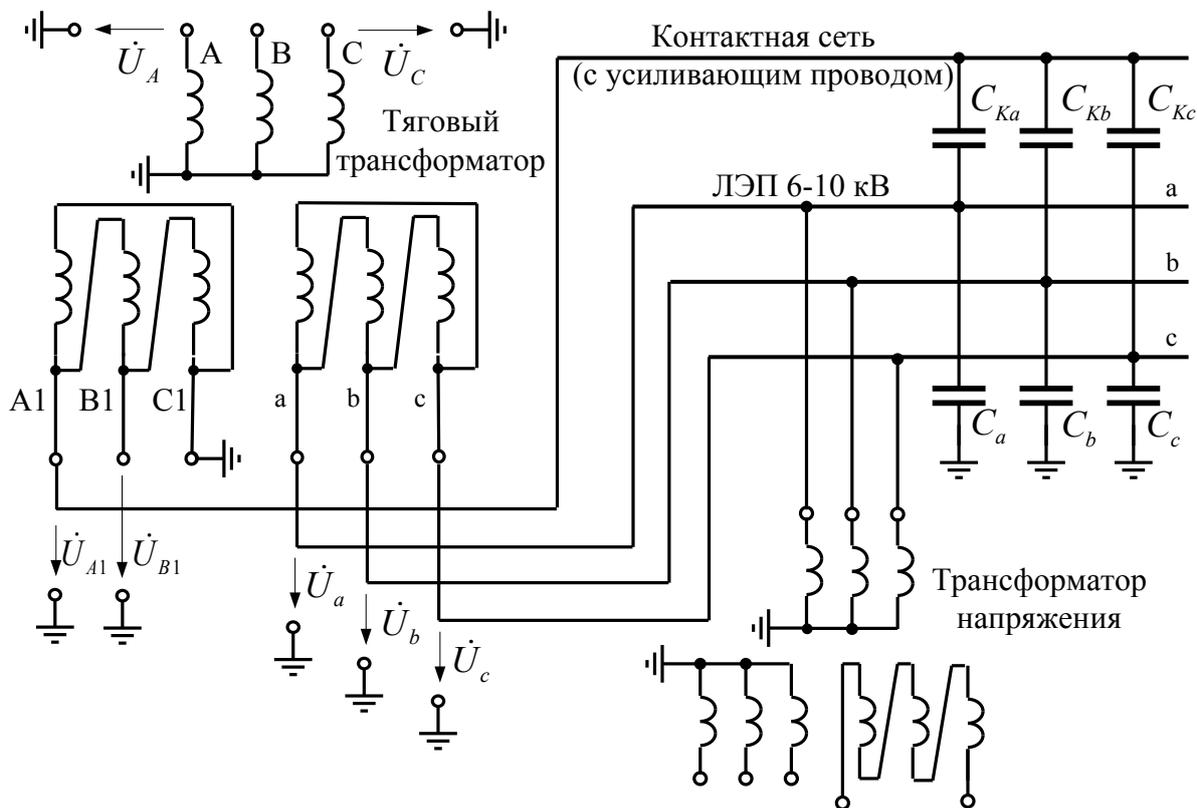
Токи электрического влияния тяговой сети на провода линий, располагающихся на опорах контактной сети, создают перетоки активной мощности между контактной сетью и смежными линиями. Поскольку линии ПР и ДПР имеют собственные счетчики электрической энергии, то эти перетоки приводят к возникновению небалансов между объемами электрической энергии, переданными в линию и потребленными нагрузками.

Магнитное влияние тяговой сети может создавать напряжения, сопоставимые с номинальными напряжениями смежных линий. Этот факт приводит к дополнительным отклонениям и несимметрии напряжений линий

«два провода – рельс». Кроме того, из-за пропорциональности наводимого напряжения магнитного влияния частоте влияющего тока происходит существенное увеличение гармонических искажений в линиях провод – рельс и два провода – рельс.

## 1.2. Эффекты влияния тяговой сети на трехфазные линии СЦБ и ПЭ напряжением 6-10 кВ

При расположении проводов трехфазных линий на опорах КС основное воздействие оказывает электрическое влияние тяговой сети 25 кВ, создающее напряжение нулевой последовательности в смежной линии. Используемая в этом случае СЭС имеет в нормальном режиме гальваническую связь с землей через первичную обмотку трехфазного трансформатора напряжения (рис. 1.1).



**Рис. 1.1. Влияние контактной сети на смежную ЛЭП:**

$C_a, C_b, C_c$  – емкостные элементы «провод линии – земля»;  
 $C_{Ka}, C_{Kb}, C_{Kc}$  – емкостные элементы «контактная сеть – провод линии»

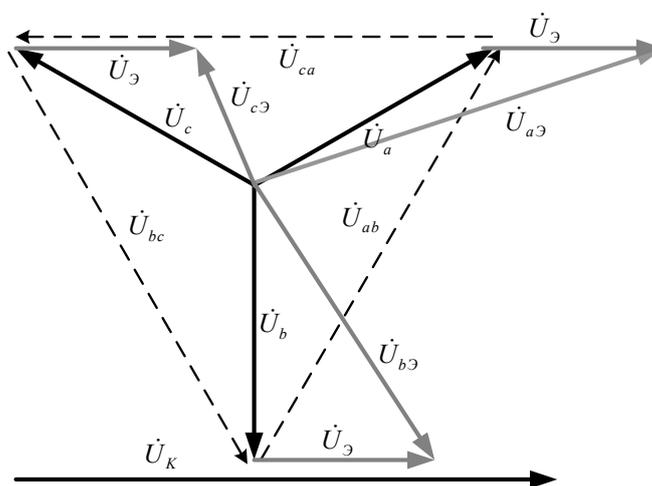
Трансформатор напряжения работает в режиме, близком к холостому ходу, потребляя ток менее 10 мА из-за высокого индуктивно-активного сопротивления его первичной обмотки, что практически не влияет на вели-

чину наводимого напряжения. Такая ситуация, не устраняя проблему электрического влияния, приводит к возможности резонансов в контуре, образованном индуктивностью трансформатора и емкостью линии.

Линия СЦБ или ПЭ обычно подключается к районной обмотке тягового трансформатора или отдельному повышающему трансформатору ТСЦБ. Если электрическое влияние тяговой сети отсутствует, то потенциалы проводов линии определяются в основном емкостями провод – земля с симметрией фазных напряжений.

Ввиду сопоставимых величин емкостей контактная сеть – смежный провод и емкостей  $C_a, C_b, C_c$  по этим элементам протекают токи от источника питания и токи электрического влияния контактной сети, фазный угол которых определяется углом напряжения КС.

Угол одного из линейных напряжений смежной линии совпадает с углом напряжения КС, и три одинаковых по величине и фазе напряжения электрического влияния нулевой последовательности накладываются на рабочие напряжения провод – земля (рис. 1.2). Возможность суммирования напряжений нормального режима и электрического влияния определяется наложением емкостных токов, создаваемых двумя источниками: трансформатором питания линии и емкостным влиянием тяговой сети.



**Рис. 1.2. Диаграмма напряжений смежной линии в условиях влияния:**  
 $\dot{U}_K$  – вектор напряжения КС;  $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$  – векторы напряжений провод – земля нормального режима без влияния контактной сети;  $\dot{U}_0$  – вектор напряжения электрического влияния;  $\dot{U}_{a0}, \dot{U}_{b0}, \dot{U}_{c0}$  – векторы суммарных напряжений провод – земля, обусловленные напряжениями питания линии и наведенными напряжениями

Из рис. 1.2 видно, что три напряжения провод – земля значительно отличаются друг от друга. Напряжение провод – земля на одном из проводов меньше номинала, на втором – существенно больше номинала. На третьем проводе напряжение меньше, чем на втором, но превосходит номинальное значение. В такой ситуации напряжение на выходе разомкнутого треугольника трансформатора напряжения соответствует величине напряжения электрического влияния, пересчитанного с учетом фазного коэффициента трансформации (5774/100:3 В для фазы треугольника трансформатора с номинальными напряжениями 10000/100/100:3 В с суммированием фазных напряжений на зажимах разомкнутого треугольника).

На отключенной незаземленной линии 10 кВ электрическое влияние контактной сети на однопутном участке железной дороги приводит к появлению напряжения по отношению к земле около 7...8 кВ на каждом проводе. На двухпутном участке напряжения на 1...2 кВ больше. В рабочем режиме линии 10 кВ из-за различных фазных углов рабочего напряжения при электрическом влиянии двухпутного участка возникают перекосы напряжения провод – земля: вместо 6 кВ по отношению к земле на каждом проводе создаются напряжения порядка 15, 11 и 5 кВ<sup>1</sup>. В итоге электрическое влияние приводит к появлению на разомкнутом треугольнике ТН напряжения, превышающего напряжение однофазного замыкания на землю.

Следствием такой ситуации может быть блокирование сигнализации об однофазных замыканиях на землю, что приведет к необнаружению однофазных замыканий и вероятному возникновению двухфазных. Еще одна негативная ситуация возникает при работах со снятием напряжения и заземлением линии основного питания СЦБ, когда электроснабжение однофазных потребителей сигнальных точек переводится на резервную линию; при этом может возникнуть эффект ложного перехода на питание от отключенной линии СЦБ, поскольку наложение заземляющих штанг производится неодновременно. При наложении штанги на один из проводов, к

---

<sup>1</sup> Без учета подключенного к линии оборудования и других линий, не расположенных на опорах контактной сети и питающихся от тех же шин распределительного устройства.

которому подключен вывод однофазного трансформатора сигнальной точки, наведенного напряжения на незаземленном проводе может оказаться достаточным для перехода питания сигнальной точки на основную линию СЦБ с непредсказуемыми последствиями.

Эффективным средством по снижению наведенных напряжений электрического влияния на линиях сети с изолированной нейтралью является установка на шинах 10 кВ подстанции конденсаторов емкостью 0,3...0,7 мкФ на каждую фазу с заземлением нейтрали звезды конденсаторов. Транспозиция проводов в этом случае влияния не оказывает. Включение в цепь разомкнутого треугольника трансформатора напряжения резистора сопротивлением 1,0...1,5 Ом также не дает эффекта из-за большой индуктивности рассеивания трансформатора и малой его мощности. Более определенно, емкости конденсаторов около 0,02 мкФ на 1 км длины линии, расположенной на опорах контактной сети, достаточно для устранения эффектов электрического влияния на линию.

Радикальным средством устранения электрического влияния является использование линий на отдельных опорах. Уже при ширине сближения 15 м наводимое напряжение не превысит 2 кВ и не будет приводить к нежелательным эффектам. В связи с этим при использовании для питания устройств СЦБ сетей 6...10 кВ с изолированной нейтралью основное питание производится от линии на отдельных опорах.

К шинам 10 кВ тяговой подстанции обычно подключены не только линии продольного электроснабжения, но и другие ЛЭП, удаленные от железной дороги. Емкости их проводов увеличивают общую емкость по отношению к земле и уменьшают наводимое напряжение электрического влияния.

### **1.3. Эффекты влияния тяговой сети на линии ПР и ДПР**

Влияние тяговой сети 25 кВ приводит к двум эффектам в смежных линиях ПР и ДПР:

–из-за электрического влияния возникают перетоки мощности между линиями, сопоставимые с суммарной мощностью подключенных к ним потребителей;

–из-за консольного питания ЛЭП ПР и ДПР и относительно большой их протяженности магнитное влияние способно приводить к существенному изменению напряжений на приемных концах.

Линии ПР и ДПР в качестве одного из проводов используют рельсы тяговой сети и при сравнительно небольшом емкостном токе электрического влияния, замыкающемся через обмотку тягового трансформатора, потенциал провода определяется напряжением трансформатора. По проводу и обмотке трансформатора протекает дополнительный ток электрического влияния, величина которого при длине межподстанционной зоны в 50 км может достигать полутора ампер. Протекая по цепям учета электрической энергии, емкостный ток может приводить к искажению показаний счетчиков энергии, которые будут регистрировать дополнительные потоки активной мощности.

Этот тезис может быть проиллюстрирован на примере одного из возможных вариантов питания линии ДПР от шин тяговой подстанции первого типа фазировки (рис. 1.3). Реакция каждого из элементов счетчика, установленного на линии ДПР, определяется произведением напряжения на элементе, протекающего тока и косинуса угла между ними. Емкостные токи между проводами ДПР, а также между каждым проводом и землей не влияют на показания счетчика. Реакция первого элемента (слева на рис. 1.3) от электрического влияния свободна, поскольку потенциалы проводов ДП1 и контактной сети одинаковы. Через второй элемент счетчика протекает дополнительный ток через элемент, образованный емкостью между проводом ДП2 и контактной сетью.

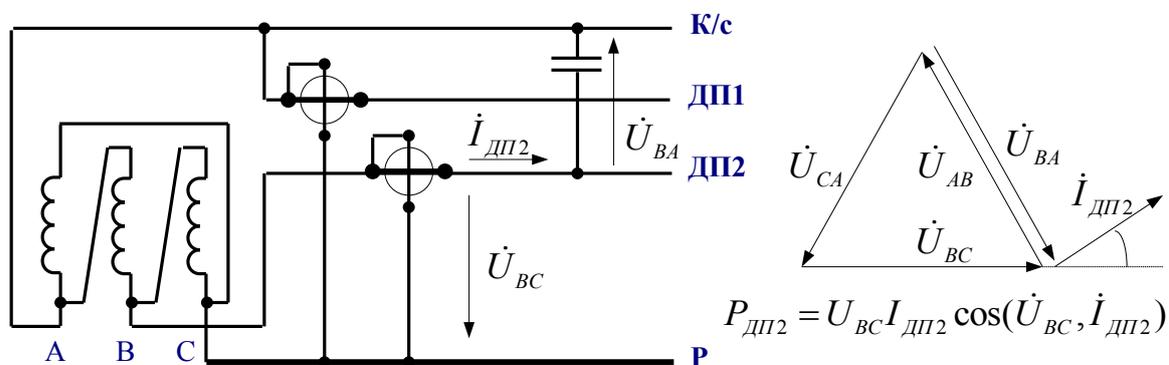


Рис. 1.3. Схема и векторная диаграмма влияния КС на линию ДПР

Из векторной диаграммы, показанной на рис. 1.3, следует, что этот ток приводит к учету дополнительной активной энергии, циркулирующей между проводом ДП2 и КС. Счетчики электроэнергии, установленные на фидерах КС, рассчитаны на значительные мощности, поэтому сравнительно небольшая мощность потока на провод ДП2 находится в пределах погрешностей прибора учета.

При других вариантах фазировки тяговых подстанций и питания линии ДПР счетчик фидера ДПР вместо дополнительного расхода электроэнергии может регистрировать получение энергии со снижением показаний электропотребления.

Расчеты показывают, что дополнительный поток активной мощности по линии ДПР (или по линии ПР, поскольку эффект определяется только одним проводом линии) составляет величину порядка 35 кВт, что соответствует 25000 кВт·ч в месяц. При совпадении фаз напряжений контактной сети и линии ПР перетоки мощности между проводом ПР и КС отсутствуют. Поток активной мощности в провод линии ДПР или ПР с несовпадающими фазами лежит в пределах 9...25 кВт в зависимости от того, с какой стороны запитана линия. Значения потоков мощности по линиям ПР и ДПР за счет влияния мало зависят от следующих факторов:

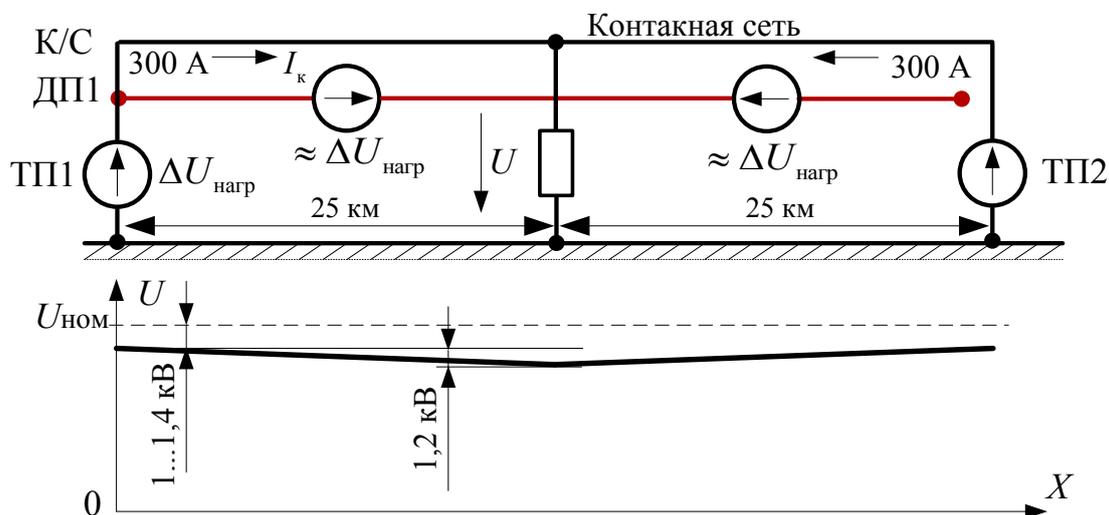
- схема питания КС: консольная или от двух смежных ТП;
- величины нагрузок тяговой сети.

Дополнительный расход электроэнергии составляет заметную долю среднего расхода энергии по линии ДПР, а для линии ПР может превышать фактический расход. На межподстанционной зоне средней длины 50 км к линии провод – рельс в среднем присоединено 25 сигнальных точек с суммарной мощностью 15...20 кВт. Электропотребление достигает 10...15 тыс. кВт·ч за месяц, т.е. имеет тот же порядок, что и дополнительный расход энергии, вызванный электрическим влиянием. Это обстоятельство делает очень затруднительным корректное измерение расхода электроэнергии по фидеру ПР.

При вынужденном режиме питания тяговой сети от одной тяговой подстанции магнитное влияние тяговой сети на консольную линию ПР или ДПР может приводить к существенным отклонениям напряжения на конце

консоли. Знак добавки к напряжению зависит от взаимной фазировки рабочего и наведенного напряжений. Расчеты режима типичной многопроводной системы, составленной тяговой сетью и линией ПР или ДПР, показывают следующие результаты.

При тяговом трансформаторе 40000 кВ·А и единственной тяговой нагрузке, приложенной в середине МПЗ, магнитное влияние уменьшает напряжение провода линии ПР в средней точке зоны настолько же, насколько уменьшается напряжение на шинах подстанции за счет тяговой нагрузки, если линия провод – рельс и контактная сеть питаются от одной и той же фазы (рис. 1.4). Таким образом, отклонение напряжения провода примерно равно удвоенному значению снижения напряжения на тяговых шинах подстанции.



**Рис. 1.4. ЭДС магнитного влияния на провод линии ПР или ДПР близка к отклонению напряжения на тяговой шине**

Если единственная тяговая нагрузка расположена в конце консоли ТС, то магнитное влияние еще заметнее: оно приводит к уменьшению напряжения на конце провода ПР, которое в 1,7 раза больше снижения напряжения на тяговой шине. Суммарный эффект получается в 2,7 раза больше просадки напряжения на шинах. При нагрузке, потребляющей ток 300 А в конце МПЗ протяженностью 50 км, и мощной системе внешнего электроснабжения напряжение на шине 27,5 кВ подстанции, питающей контактную сеть и провод ПР, снижается на 1,4 кВ, а на конце линии ПР напряжение ниже еще на 2,4 кВ.

#### 1.4. Качество электроэнергии потребителей, подключенных к линии ДПР

Системы продольного электроснабжения нетяговых потребителей с линиями ПР и ДПР обладают рядом негативных особенностей, сказывающихся на качестве электрической энергии. Эти особенности обусловлены питанием линий от тяговых шин ТП и расположением проводов на опорах контактной сети:

- нестационарность и резкопеременный характер тяговых нагрузок приводит к значительным отклонениям и колебаниям напряжений на шинах тяговых трансформаторов, питающих, кроме тяги, также нетяговых и нетранспортных потребителей;

- на шинах, от которых питаются линии продольного электроснабжения, возникает несимметрия напряжения за счет однофазного характера тяговой нагрузки;

- отечественные электровозы являются значительными источниками высших гармоник тока;

- эти источники гармоник являются однофазными, в связи с чем не подавляются гармоники, номера которых кратны трем;

- магнитное влияние на высших гармониках из-за пропорциональности наводимой ЭДС частоте влияющего тока увеличивает несинусоидальность напряжений на смежных проводах по отношению к земле.

Электрическое влияние контактной сети не приводит к увеличению относительной доли высших гармоник. Существенный рост гармонических искажений напряжений провод – земля наблюдается в линиях ПР и ДПР, причем этот эффект в напряжении провод – провод линии ДПР практически не сказывается.

Приближенную оценку вклада магнитного влияния в несинусоидальность напряжения провод – земля можно сделать следующим образом. Напряжение магнитного влияния от тока гармоники  $I_k$  с номером  $k$  частотой  $k\omega = 2\pi f k$  определяется законом электромагнитной индукции с учетом коэффициента экранирования рельсами:

$$U_k = k\omega M_k I_k l s_p,$$

где  $M_k = 10^{-4} \ln \left( 1 + \frac{6 \cdot 10^5}{a^2 \sigma f k} \right)$  – взаимная индуктивность контуров смежный провод – земля и контактная сеть – земля на 1 км длины, Гн/км;  $a$  – ширина сближения, м;  $\sigma$  – удельная электропроводность земли, См/м;  $l$  – протяженность смежного провода, предполагаемая не более длины влияющего участка контактной сети, км;  $s_p$  – коэффициент экранирования рельсами, лежащий в пределах 0,4...0,6.

При аппроксимации тягового тока прямоугольными импульсами с амплитудой  $I_m$  амплитуда тока нечетной гармоники<sup>1</sup> с номером  $k$  определяется следующим выражением:

$$I_{km} = \frac{4I_m}{k\pi}.$$

При этом эффективное значение напряжения наводимых высших гармоник

$$U_{эфф} = \sqrt{\sum_{k=3,5,7...}^n U_k^2} = \frac{4I_m \omega l s_p}{\pi \sqrt{2}} \sqrt{\sum_{k=3,5,7...}^n M_k^2},$$

где суммирование производится только по нечетным гармоникам с ограничением примерно двадцать первой гармоникой из-за снижения реального уровня ВГ тока на более высоких частотах. Коэффициент  $1/\sqrt{2}$  переводит амплитуду в эффективное значение.

Напряжение  $U_{эфф}$  сопоставимо с наведенным напряжением основной частоты, поэтому нужно ожидать серьезного различия несинусоидальности напряжений провод – земля линии ДПР по сравнению с напряжением провод – провод. Оценка суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения провод – земля при токе контактной сети 300 А, ширине сближения 7 м, длине линии 25 км и проводимости земли 0,01 См/м показывает значение суммарного коэффициента гармоник в 13 %.

Приведенное значение нужно считать оценкой сверху для вклада магнитного влияния в несинусоидальность напряжений провод – земля,

---

<sup>1</sup> Четные гармоники при токе, симметричном относительно оси времени, отсутствуют.

поскольку обычно используется двустороннее питание тяговой сети с компенсацией влияний отдельных участков; к тому же амплитуда токов гармоник падает с частотой несколько быстрее обратно пропорциональной зависимости. С другой стороны, несинусоидальность напряжений ДПР возникает как из-за гальванической связи с контактной сетью через шины 27,5 кВ подстанции, так и из-за магнитного влияния. Ввиду наличия двух причин несинусоидальности уровень гармоник напряжений провод – земля линии ДПР обычно значительно выше максимально допустимого значения (8 % для сети напряжением 25 кВ по ГОСТ 32144-2013 [23]).

### **Выводы**

1. Электрическое влияние контактной сети электрифицированной железной дороги 27,5 кВ на трехфазную линию 6...10 кВ с изолированной нейтралью, расположенную на опорах контактной сети, приводит к появлению напряжения прямой последовательности на проводах линии, нарушающего нормальную работу сигнализации об однофазных замыканиях на землю.

2. В системе проводов ДПР – ПР – контактная сеть происходит циркуляция электрической энергии из-за взаимного электрического влияния проводов, приводящая к возникновению небалансов учета электроэнергии фидеров ПР и ДПР.

3. Магнитное влияние на линии провод – рельс и два провода – рельс при консольном питании контактной сети существенно изменяет напряжения на приемных концах этих линий. Указанные изменения могут приводить как к снижению напряжений провод – земля, так и к их возрастанию.

4. При наличии ВГ наблюдается повышенное влияние тяговой сети 25 кВ на смежные линии ПР и ДПР. В совокупности с гальванической связью линий с контактной сетью через шины подстанции это приводит к значительной несинусоидальности рабочих напряжений провод – земля линий.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)