

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений	5
Введение	7
1. Качество электроэнергии в сетях, примыкающих к тяговым подстанциям	11
1.1. Отклонения напряжения.....	12
1.2. Несимметрия напряжения	18
1.3. Амплитудно-фазовые характеристики несимметрии напряжений.....	21
1.4. Гармонические искажения	34
1.5. Провалы напряжения.....	38
Выводы	40
2. Влияние несимметрии и гармонических искажений на работу генераторов малой мощности.....	41
2.1. Влияние несимметрии	41
2.2. Влияние высших гармоник.....	54
2.3. Совместное воздействие несимметрии и гармонических искажений	61
Выводы	73
3. Микросети для питания нетяговых потребителей	75
3.1. Микрогрид, наногрид и пикогрид.....	75
3.2. Режимы микрогрид с синхронными генераторами	83
3.3. Имитационное моделирование режимов СЭЖД с асинхронными генераторами	95
3.4. Фликер в сетях с установками РГ и способы его устранения	106
Выводы	117

4. Энергетические роутеры для питания нетяговых потребителей.....	119
4.1. Структура энергетического роутера.....	119
4.2. Твердотельные трансформаторы.....	126
4.3. Установившиеся и переходные режимы сетей с энергетическими роутерами.....	131
4.4. Аварийные режимы в СЭС с энергетическими роутерами.....	139
Выводы	143
Заключение	144
Библиографический список.....	149
Приложение А. Амплитудно-фазовые характеристики несимметрии напряжений СТЭ 94 кВ.....	163

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АРВ — автоматический регулятор возбуждения
АРЧВ — автоматический регулятор частоты вращения
АСГ — асинхронный генератор
АФХ — амплитудно-фазовые характеристики
АЭД — асинхронный электродвигатель
В — выключатель
ВГ — высшие гармоники
ВПТ — вставка постоянного тока
ДЧ — датчик частоты вращения
ИРМ — источник реактивной мощности
ИЭЭС ААС — интеллектуальная ЭЭС с активно-адаптивной сетью
КЗ — короткое замыкание
КПД — коэффициент полезного действия
КС — контактная сеть
ЛЭП — линия электропередачи
МПЗ — межподстанционная зона
НВИЭ — нетрадиционные возобновляемые источники энергии
ОАО РЖД — открытое акционерное общество «Российские железные дороги»
ОВ — обмотка возбуждения
о.е. — относительные единицы
ПК — программный комплекс
ПКЭ — показатели качества электроэнергии
ПИ — пропорционально-интегральный регулятор
ПИД — пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор
Р — реактор
РГ — распределённая генерация
РМ — реактивная мощность
РЭС — район электроснабжения нетяговых потребителей
СГ — синхронный генератор
СТ — симметрирующий трансформатор
СТЭ — система тягового электроснабжения
СЭЖД — система электроснабжения железной дороги
СЭС — система электроснабжения

Т — турбина
ТИ — телеизмерения
ТН — трансформатор напряжения
ТП — тяговая подстанция
ТС — тяговая сеть
ТТ — трансформатор тока
ЭПС — электроподвижной состав
ЭР — энергетический роутер
ЭЭ — электрическая энергия
ЭЭС — электроэнергетическая система
FACTS — flexible alternative current transmission systems
(гибкая система передачи переменного тока)
Smart grid — интеллектуальная электрическая сеть
SST — твердотельный трансформатор

ВВЕДЕНИЕ

Магистральное направление развития электроэнергетики России основывается на переходе к новой технологической платформе, в основу которой положена концепция интеллектуальных электрических сетей. Для реализации этой концепции требуется решение следующих задач [37, 122, 140]:

- применение эффективных устройств для дистанционных измерений параметров режима ЭЭС;
- внедрение быстродействующих вычислительных комплексов и информационных технологий, использующих достижения в области искусственного интеллекта, для оценки состояния ЭЭС и управления;
- установка в сетях активных, автоматически управляемых технических средств регулирования режимов ЭЭС;
- создание системы управления нормальными и аварийными режимами, основанной на применении интеллектуальных технологий;
- широкомасштабное использование установок распределенной генерации [31, 135], в том числе реализованных на основе возобновляемых источников энергии;
- улучшение качества электроэнергии [38–41] и повышение эффективности использования энергоресурсов.

Цель указанных преобразований состоит в переходе к интеллектуальным энергосистемам с активно-адаптивными сетями, построенным с использованием технологий энергетического интернета — «Энерджинет».

Одним из достаточно емких потребителей электроэнергии является железнодорожный транспорт [108]. Электросетевой комплекс ОАО «РЖД» является сложной технической системой, обеспечивающей решение следующих задач:

- электроснабжение тяги поездов;
- питание объектов, обеспечивающих безопасность движения (сигнализация, централизация, автоблокировка и связь);
- электроснабжение объектов железнодорожной инфраструктуры: эксплуатационных и ремонтных депо [9, 80], центров обработки данных, вокзалов и т. д.

Основу электросетевого комплекса составляют тяговые подстанции и сети, обеспечивающие надежное электроснабжение

перевозочного процесса, а также нетяговых и нетранспортных потребителей. На некоторых ТП электропотребление нетяговыми объектами превосходит расход электроэнергии на тягу поездов.

В электрических сетях, примыкающих к тяговым подстанциям, а также в системах электроснабжения железных дорог в полном объеме применимы технологии интеллектуальных сетей [47, 51, 52, 75, 76, 84–88, 100–102, 130, 131]. Однако СЭЖД обладают рядом особенностей, существенно отличающих их от электрических сетей общего назначения. К этим особенностям можно отнести [9, 65]:

- резкопеременную, однофазную и нелинейную тяговую нагрузку;
- значительную пространственную распределенность;
- перемещение потребителей электроэнергии в пространстве; причем скорость этих перемещений с каждым годом возрастает.

Однофазные тяговые нагрузки создают в сетях, примыкающих к ТП, значительные отклонения напряжений и уровни несимметрии, неблагоприятно влияющие на работу большинства потребителей электроэнергии. Нелинейные вольтамперные характеристики выпрямительных электровозов являются причиной генерации высших гармоник, также негативно влияющих на электрооборудование.

Перечисленные факторы необходимо учитывать при разработке и внедрении технологий интеллектуальных сетей на объектах железнодорожного транспорта. Для эффективного применения этих технологий необходима разработка методов моделирования СЭЖД, позволяющих адекватно учитывать активные элементы и неопределенность информации о параметрах и режимах ЭЭС. Такие методы могут быть реализованы на основе применения современных методов моделирования, в основу которых могут быть положены два вида моделей:

- статические и квазидинамические модели, реализованные на основе фазных координат;
- динамические модели, формируемые на базе средств программной системы MATLAB.

Реализация концепции интеллектуальных электрических сетей, использующих технологии «Энерджинет», требует решения большого комплекса научно-технических задач. В настоящей работе рассматриваются несколько таких задач, а именно:

- разработка методов и средств моделирования режимов СЭЖД, оснащенных установками распределенной генерации, реализованными на базе синхронных и асинхронных машин относительно небольшой мощности;

- создание средств моделирования систем электроснабжения нетяговых потребителей, использующих энергетические роутеры, в основу которых положены твердотельные трансформаторы.

- Научную новизну работы определяют следующие результаты:

- на основе экспериментальных исследований и компьютерного моделирования определены допустимые режимы работы синхронных генераторов малой мощности в условиях пониженного качества электроэнергии по несимметрии и гармоническим искажениям;

- предложены оригинальные технологии компьютерного моделирования СЭЖД, оснащенных установками РГ с синхронными генераторами;

- разработана математическая модель асинхронного генератора, отличающаяся от известных структурой в виде трех источников токов, параметры которых корректируются на итерациях расчета стационарного режима СЭЖД; на базе этой модели предложены оригинальные технологии имитационного моделирования квазидинамических режимов работы СЭЖД, оборудованных асинхронными генераторами;

- предложены методы устранения фликера в сетях с установками РГ, отличающиеся от известных использованием согласованной настройки автоматических регуляторов возбуждения и частоты;

- предложены технологии компьютерного моделирования нормальных и аварийных режимов систем электроснабжения, оснащенных энергетическими роутерами; эти технологии отличаются от известных возможностью применения в железнодорожных электрических сетях 6...10 кВ, характеризующихся пониженным качеством электроэнергии.

- Практическая значимость работы определяется тем, что на основе предложенных авторами методов и средств компьютерного моделирования возможно решение следующих актуальных задач, возникающих при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения железных дорог:

- внедрение эффективных технологий интеллектуальных сетей и «Энерджинет» в системы электроснабжения ответственных потребителей железнодорожного транспорта;
- определение областей допустимой работы установок РГ при наличии несимметрии и гармонических искажений;
- устранение фликера в сетях, оборудованных генераторами малой мощности.

В первой главе проанализированы показатели, характеризующие качество электроэнергии в электрических сетях, примыкающих к тяговым подстанциям. Во второй — рассмотрены вопросы влияния несимметрии и гармонических искажений на работу генераторов малой мощности. Третья глава посвящена применению технологий интеллектуальных сетей (мик로그рид, наногрид и пикогрид) в системах электроснабжения нетяговых потребителей. Здесь же представлены результаты моделирования режимов систем электроснабжения, оснащенных установками распределенной генерации, реализованными на базе синхронных и асинхронных машин, а также рассмотрен вопрос об устранении фликера в сетях с генераторами малой мощности. В четвертой главе представлены результаты моделирования СЭС, построенных с использованием энергетических роутеров.

1. КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕТЯХ, ПРИМЫКАЮЩИХ К ТЯГОВЫМ ПОДСТАНЦИЯМ

Результаты инструментальных измерений показателей качества электроэнергии показывают, что на шинах высокого напряжения тяговых подстанций Транссиба имеют место значительные нарушения симметрии и синусоидальности напряжений [111]. Средние за сутки значения коэффициентов несимметрии по обратной последовательности k_{2U} регулярно достигают 3...4 %, а максимальные — 6...7 %; аналогичные данные по суммарным коэффициентам гармонических составляющих k_U соответственно равны 5...6 и 8...10 %.

В качестве иллюстрации на рис. 1.1 представлены результаты синхронизированных измерений, выполненных на семи подстанциях одной из магистральных железных дорог Восточной Сибири в 2011 г. при проведении предпроектных исследований, направленных на разработку методов и средств снижения несимметрии и гармонических искажений [36].

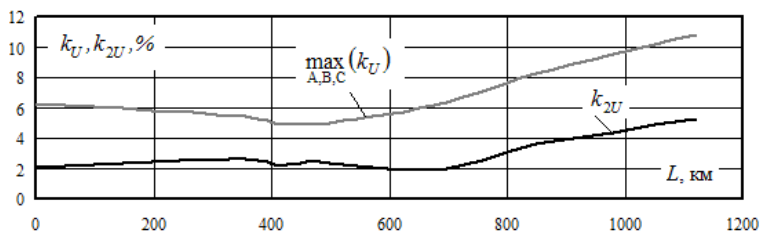


Рис. 1.1. Результаты синхронизированных измерений k_{2U} и k_U :
 L — протяженность трассы железной дороги

Ниже представлены результаты анализа показателей качества электроэнергии, выполненного по результатам измерений ПКЭ на одной из железных дорог Сибири, а также по результатам моделирования реальных и типовых СЭЖД в программном комплексе Fazonord [112]. Анализ проводился для следующих показателей:

- коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности k_{2U} ;
- суммарного коэффициента гармонических составляющих k_U ;
- глубины и длительности провалов напряжения.

Кроме того, детально рассмотрен вопрос, связанный с амплитудно-фазовыми характеристиками несимметрии.

1.1. Отклонения напряжения

Резкопеременный характер тяговых нагрузок приводит к значительным отклонениям напряжений в узловых точках сетей, примыкающих к ТП железных дорог, электрофицированных на переменном токе. На рис. 1.2 показан график изменения нагрузок тяговой подстанции при движении семи поездов массой 3200 т в нечетном направлении и такого же количества поездов массой 6000 т — в четном.

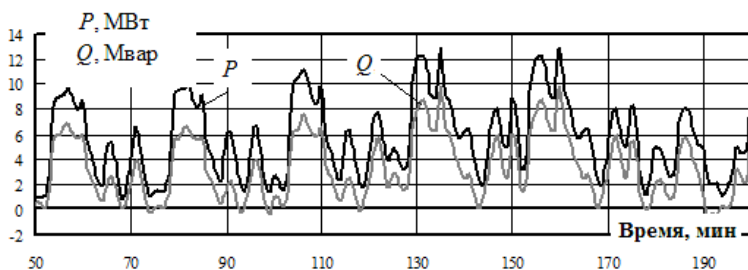


Рис. 1.2. Нагрузки тяговой подстанции

Резкопеременная динамика изменения тяговых нагрузок приводит к значительным отклонениям напряжений на шинах тяговых подстанций. На рис. 1.3 представлены графики, иллюстрирующие отклонения напряжений на шинах 110 кВ тяговой подстанции одной из железных дорог Сибири. Из анализа этих временных зависимостей можно сделать вывод о том, что максимальные отклонения напряжений могут достигать 12 % от номинального значения.

Исследование процессов изменения напряжений на шинах 10 кВ районной обмотки ТП, предназначенной для электроснабжения нетяговых и нетранспортных потребителей, проведено на основе компьютерного моделирования в ПК Fazonord [112]. В состав схемы (рис. 1.4) расчетной модели входили следующие элементы:

- пять участков двухцепной ЛЭП 220 кВ;
- четыре тяговых подстанции с трансформаторами мощностью в 40 МВ·А;
- три межподстанционные зоны протяженностью 50 км, в середине которых имелись посты секционирования.

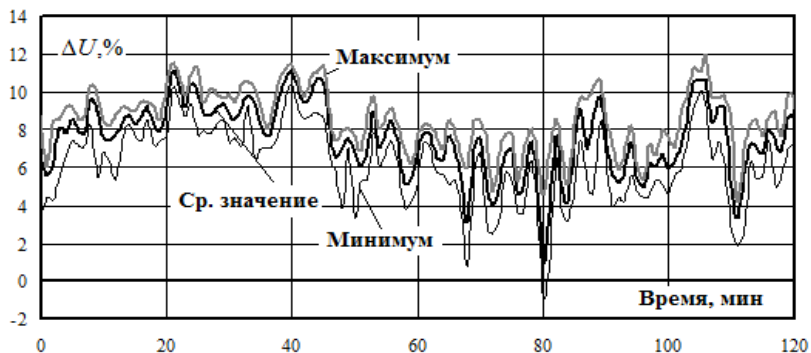


Рис. 1.3. Зависимость отклонений напряжения от времени

Рассматривалось движение девяти поездов массой 5000 т в нечетном направлении и такого же количества поездов аналогичной массы — в четном (рис. 1.5, 1.6). Для обеспечения пропуска такого количества поездов на посту секционирования второй МПЗ был установлен управляемый ИРМ с пределами регулирования — 10...+10 Мвар.

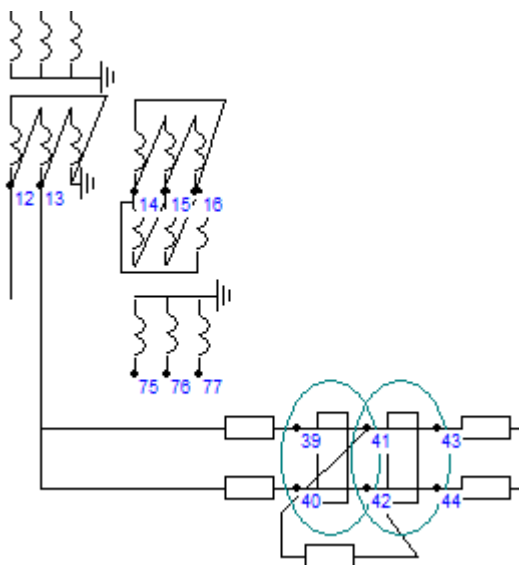


Рис. 1.4. Фрагмент схемы расчетной модели

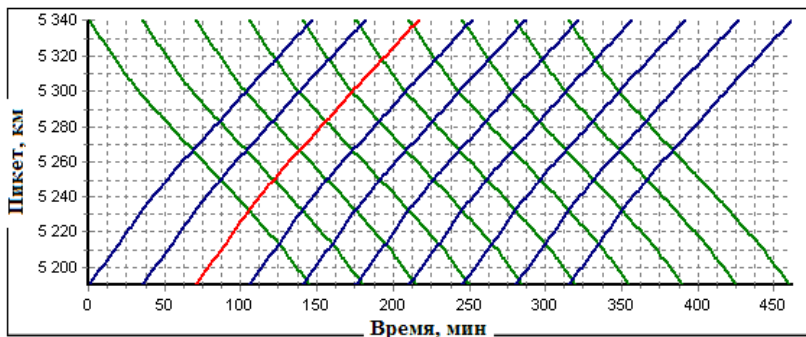
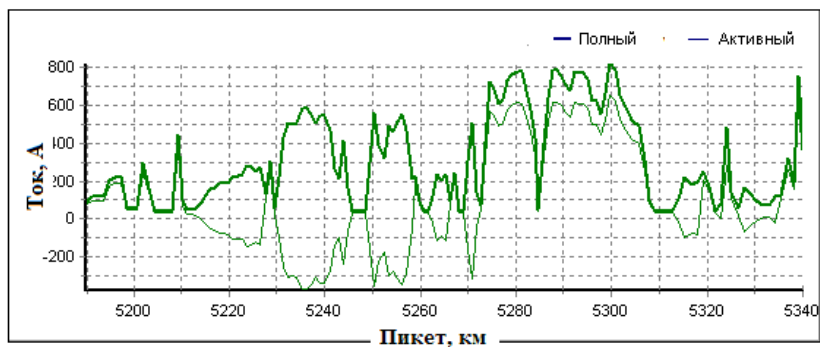
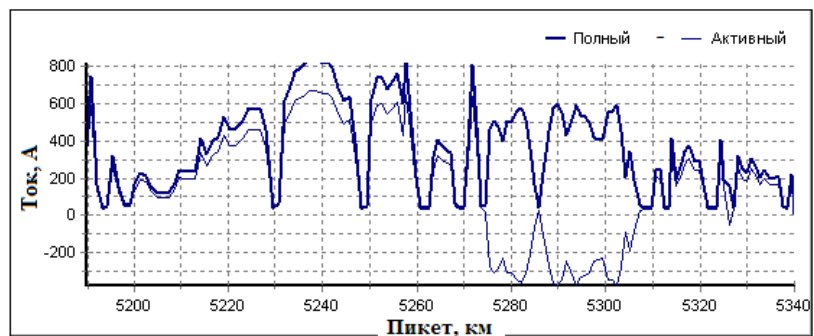


Рис. 1.5. График движения поездов



а)



б)

Рис. 1.6. Токовые профили:
а — нечетного поезда; б — четного поезда

Результаты моделирования представлены в табл. 1.1 и проиллюстрированы на рис. 1.7–1.9.

Таблица 1.1

Сводные показатели по отклонениям напряжения

Параметр	ТП2			ТП3		
	АВ	BC	CA	CA	АВ	BC
Минимум, %	-3,41	-10,92	-9,75	-5,2	-13,1	-12,7
Ср. значение $\overline{\Delta U}$, %	2,09	-0,65	1,81	1,6	-2,2	-2,3
Максимум, %	7,17	4,44	8,28	8,4	2,6	6,6
Дисперсия, %	10,70	16,69	18,84	11,0	21,7	24,6
С. к. о. $\sigma(\Delta U)$, %	3,27	4,09	4,34	3,3	4,7	5,0
Размах $R(\Delta U)$, %	10,58	15,35	18,04	13,6	15,7	19,3
Коэффициент осцилляции V_R	5,07	-23,49	9,98	8,6	-7,1	-8,3
Коэффициент вариации V_σ	1,57	-6,25	2,40	2,1	-2,1	-2,1

Примечание: $V_R = \frac{R(\Delta U)}{\Delta U}$; $V_\sigma = \frac{\sigma(\Delta U)}{\Delta U}$.

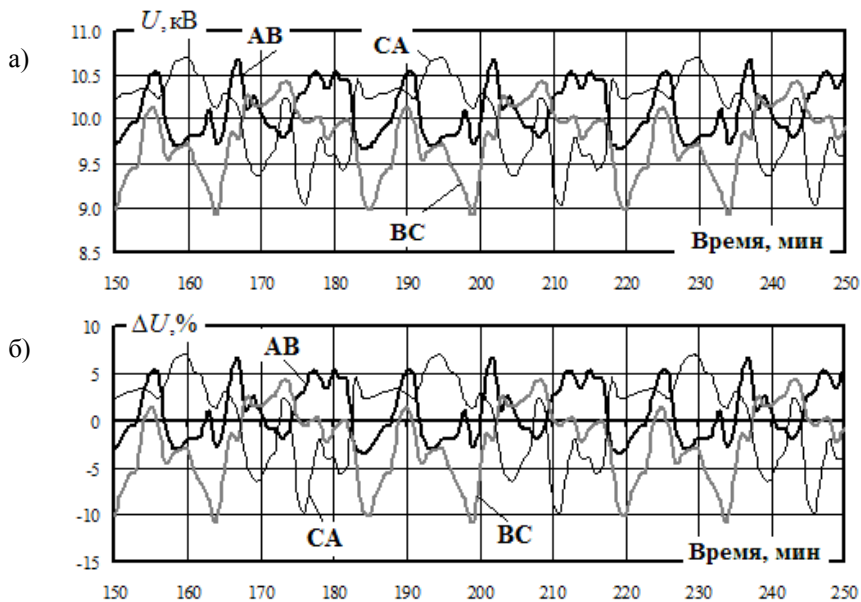


Рис. 1.7. Динамика изменений (а) и отклонений (б) напряжений на шинах 10 кВ ТП 2

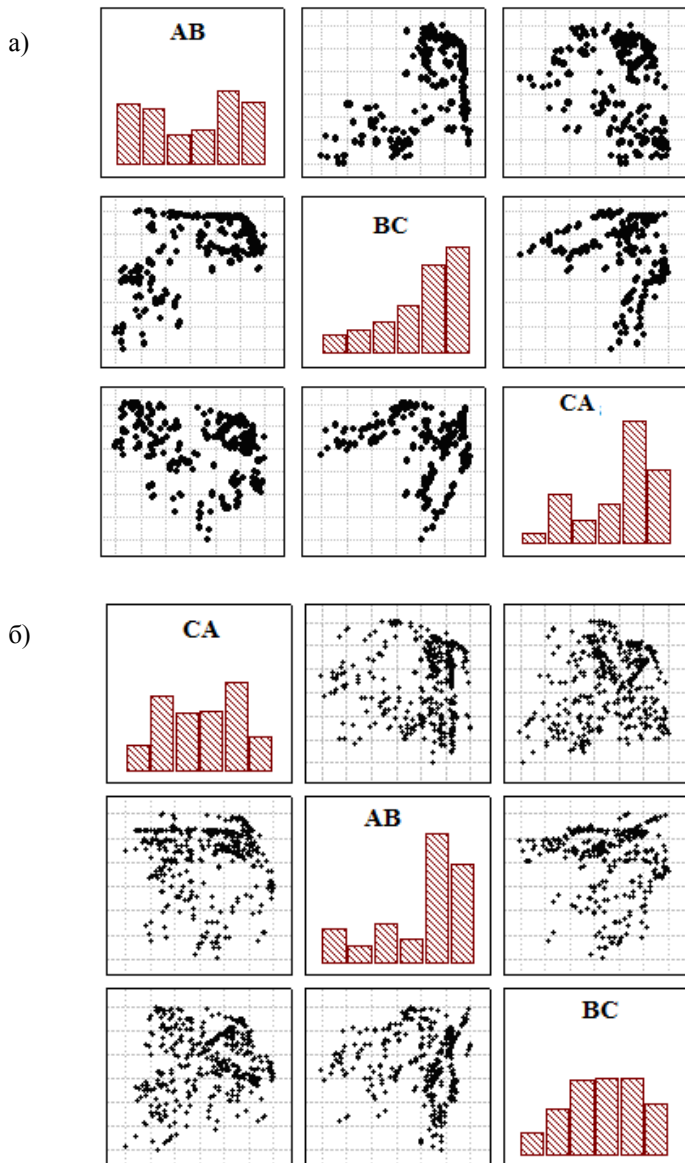
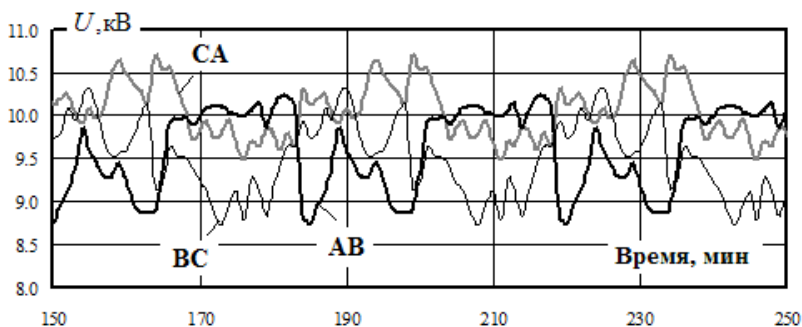
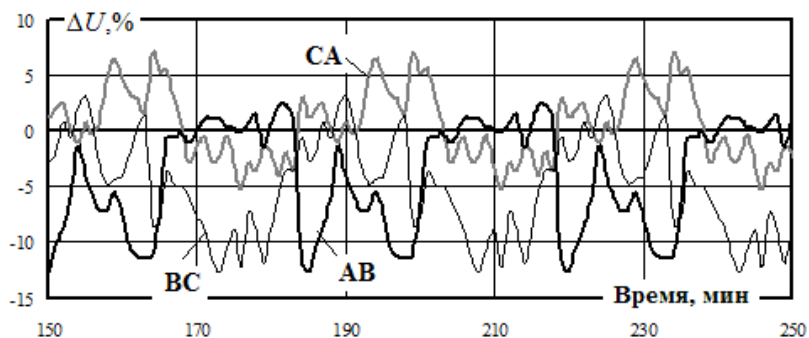


Рис. 1.8. Матричные графики напряжений:
 а) — ТП 2; б) — ТП 3



а)



б)

Рис. 1.9. Динамика изменений (а) и отклонений (б) напряжений на шинах 10 кВ ТП 3

Анализ полученных результатов позволяет сформулировать следующие выводы:

- резкопеременная тяговая нагрузка создает заметные отклонения напряжений на шинах 10 кВ ТП, превышающие по абсолютной величине 10...13 %;
- из-за однофазного характера нагрузки максимальные отклонения линейных напряжений, отвечающие разным фазам, отличаются более чем в два раза;
- максимумы абсолютных величин отклонений напряжений на ТП 2, расположенной на 50 км ближе к источнику, значительно ниже аналогичного показателя для ТП 3.

1.2. Несимметрия напряжения

Однофазные тяговые нагрузки $P_1 + jQ_1$ и $P_2 + jQ_2$, подключенные к плечам питания тяговой подстанции (рис. 1.10), могут создавать значительные уровни несимметрии на шинах 110–220 и 6–10 кВ. Результаты измерений (рис. 1.11), выполненных на ТП одной из железных дорог, показывают, что уровни несимметрии почти в два раза превышают предельно допустимые значения.

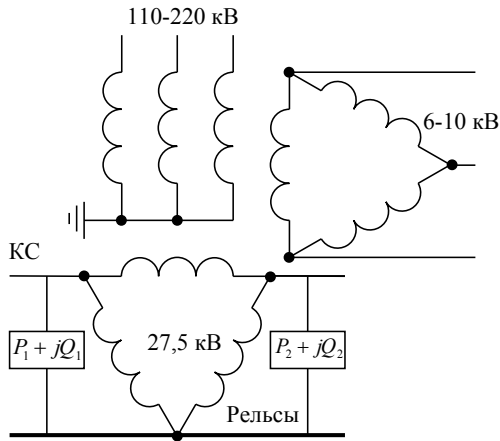


Рис. 1.10. Схема ТП

граммами (рис. 1.14). Коэффициент несимметрии по обратной последовательности составлял 3,4 %.

Для дополнительной иллюстрации сказанного выполнено компьютерное моделирование типовой СЭЖД (рис. 1.12), фрагмент расчетной схемы которой показан на рис. 1.13. Моделирование осуществлялось по методике, изложенной в работах [42–46, 48, 49]. Результаты моделирования представлены в табл. 1.2 и проиллюстрированы векторными диа-

Таблица 1.2

Режим ТП

Узлы	U		I	
	кВ	град.	А	град.
10	63,25	–3,92	76,82	–20,98
12	66,069	118,301	47,26	41,64
11	62,527	–120,546	106,99	–177,98
21	25,604	–6,371	164,13	123,37
26	24,282	57,533	350,8	–165,83



Рис. 1.11. Зависимость коэффициента несимметрии по обратной последовательности от времени

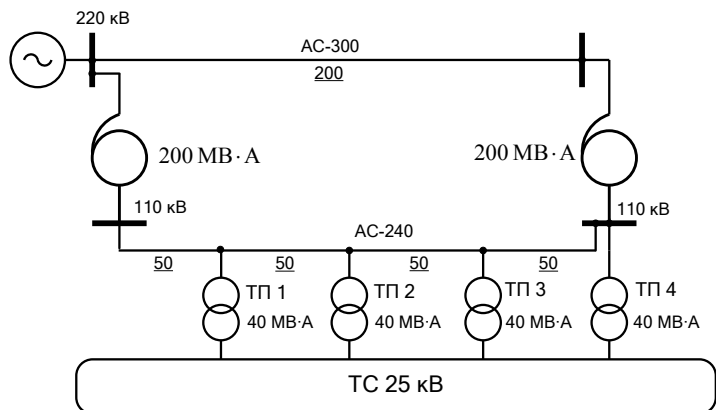


Рис. 1.12. Схема СЭЖД 1×25 кВ

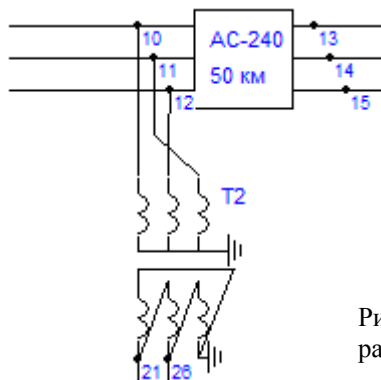


Рис. 1.13. Фрагмент схемы расчетной модели

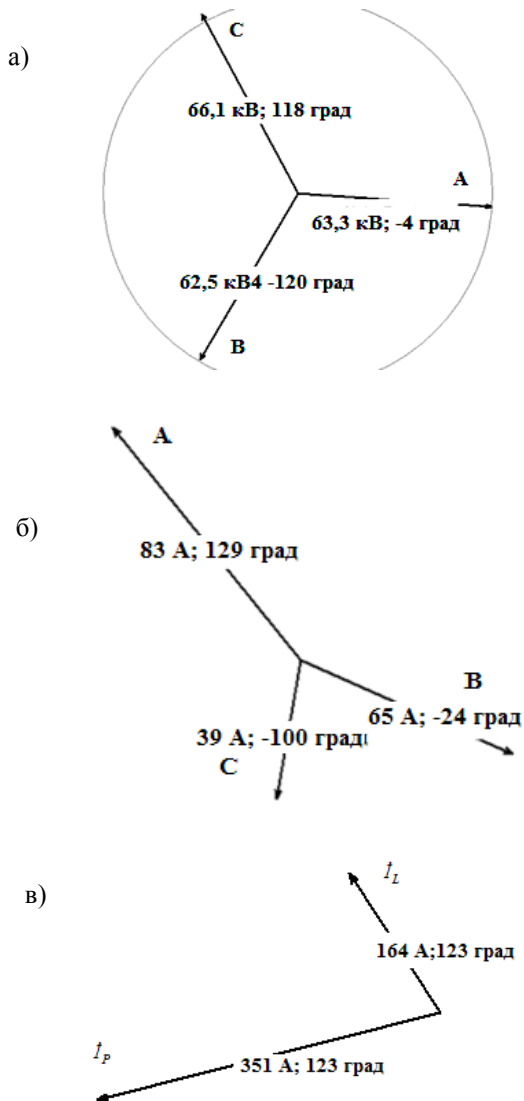


Рис. 1.14. Векторные диаграммы токов:
 а — на шинах 110 кВ ТП; б — на вводах 110 кВ ТП;
 в — на вводах 27,5 кВ ТП

Уровни несимметрии зависят от многих факторов:

- мощностей КЗ в точках подключения тяговых подстанций (рис. 1.15);
- профиля пути;
- масс и скоростей поездов и интервалов их попутного следования.

Подробный анализ факторов, влияющих на уровни несимметрии в СЭЖД, приведен в работе [66].

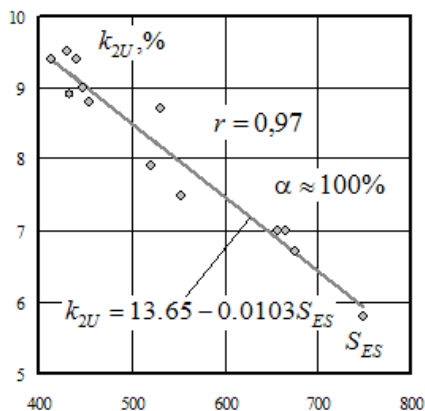


Рис. 1.15. Регрессионный анализ зависимости коэффициента несимметрии от мощности КЗ для сети 220 кВ, питающей тяговые подстанции одной из железных дорог Восточной Сибири

1.3. Амплитудно-фазовые характеристики несимметрии напряжений

Несимметричные режимы в трехфазных электрических сетях характеризуются комплексными значениями фазных напряжений или их симметричных составляющих для прямой, обратной и нулевой последовательностей:

$$\dot{U}_A = U_A e^{j\phi_{UA}}; \quad \dot{U}_B = U_B e^{j\phi_{UB}};$$

$$\dot{U}_C = U_C e^{j\phi_{UC}}; \quad \dot{U}_1 = U_1 e^{j\phi_{U1}};$$

$$\dot{U}_2 = U_2 e^{j\phi_{U2}}; \quad \dot{U}_0 = U_0 e^{j\phi_{U0}}.$$

Таким образом, наиболее полное описание несимметричного режима требует определения амплитудных U_A, U_B, U_C (U_1, U_2, U_0) и фазовых $\varphi_{UA}, \varphi_{UB}, \varphi_{UC}$ ($\varphi_{U1}, \varphi_{U2}, \varphi_{U0}$) параметров.

Наряду с перечисленными параметрами могут быть введены комплексные коэффициенты

$$\begin{aligned}\dot{k}_{2U} &= k_{2U} e^{j\beta_2} = k_{2U} e^{j(\varphi_{U2} - \varphi_{U1})}; \\ \dot{k}_{0U} &= k_{0U} e^{j\beta_0} = k_{0U} e^{j(\varphi_{U0} - \varphi_{U1})}.\end{aligned}$$

В большинстве работ по качеству электроэнергии и в действующих нормативных документах рассматриваются только амплитудные значения k_{2U}, k_{0U} этих коэффициентов, позволяющие определять допустимость теплового воздействия несимметрии на электрооборудование.

Для систем электроснабжения железных дорог, в которых составляющие нулевой последовательности не проявляются, в работах [113, 114, 119] предлагается рассматривать фазовый показатель $\beta_2 = \varphi_{U2} - \varphi_{U1}$. Как указано в этих работах, учет амплитудных и фазовых значений позволит более адекватно анализировать влияние несимметрии напряжений на электрооборудование.

Методы измерения параметров β_2 предложены в работах [113, 114], однако методология расчетов этих показателей развита слабо. В данном разделе приведены результаты разработок технологий компьютерного моделирования, позволяющих определять параметры β_2 и β_0 . Эти технологии реализованы в программном комплексе Fazonord на базе методов определения режимов СЭЖД в фазных координатах [42, 48, 82].

Рассматриваемые технологии являются универсальными и позволяют определять несимметрию как в типовых СЭЖД 25 и 2×25 кВ, так и в перспективных системах повышенного напряжения [9, 127, 137]. Примеры моделирования приведены далее.

Моделирование осуществлялось программным комплексом Fazonord для типовых систем тягового электроснабжения 25 кВ и 2×25 кВ (см. рис. 1.12, рис. 1.16, 1.17). Рассматривались двухпутные участки железной дороги протяженностью 150 км. Системы тягового электроснабжения включали три межподстанционные зоны длиной в 50 км.

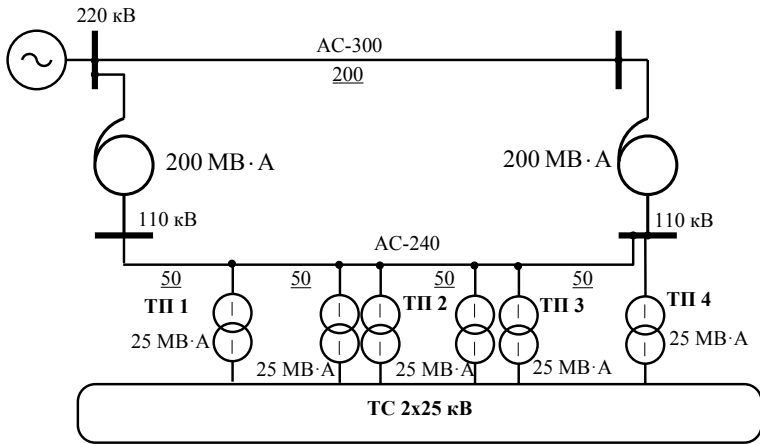


Рис. 1.16. Схема СЭЖД 2×25 кВ

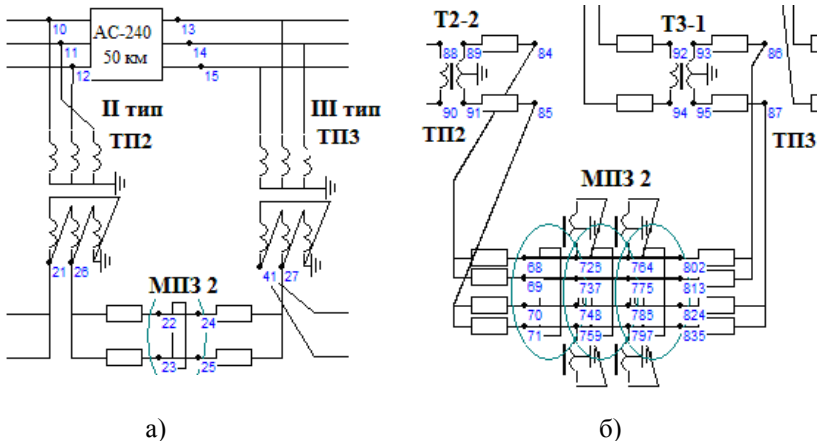


Рис. 1.17. Фрагменты схемы расчетных моделей:
а — для СЭЖД 25 кВ; б — для СЭЖД 2×25 кВ

Моделирование проведено в двух вариантах [68]:

- 1) движение одного грузового поезда массой 3200 т в нечетном направлении;
- 2) движение пакета из шести грузовых поездов массой 3200 т в нечетном направлении и такого же количества поездов массой 6000 т — в четном (рис. 1.18, 1.19).

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru