

Моделирование влияния преобразователей на сеть

в среде системы Design — PSpice

В статье рассмотрена эффективная методология анализа влияния преобразователей на качество электроэнергии, которая поддерживается пакетом программ системы Design — PSpice и позволяет корректно проводить гармонический анализ кривых тока и напряжения в электротехнических комплексах и системах, содержащих силовые полупроводниковые преобразователи, а также выбирать параметры фильтрокомпенсирующих устройств.

**Леонид Добрусин,
д. т. н., академик АЭН РФ**

antaniija@vei.ru

Введение

Проблема качества электроэнергии является исключительно актуальной для электроэнергетики России [1].

Соответствие качества электроэнергии стандартным требованиям необходимо для обеспечения мероприятий по защите жизни и здоровья граждан, имущества физических и юридических лиц, государственного и муниципального имущества; по охране окружающей среды; для повышения технико-экономических показателей производств и качества выпускаемой ими продукции.

Вместе с тем результаты систематического контроля показателей качества электроэнергии в отечественных системах электроснабжения, полученные в последние годы [2], свидетельствуют, что качество электроэнергии, поставляемой энергоснабжающими организациями потребителям электроэнергии, продолжает оставаться низким.

Не дает должного эффекта обязательная сертификация электрической энергии, так как она имеет существенные правовые и нормативные ограничения.

Правовое ограничение состоит в том, что обязательная сертификация электрической энергии осуществляется в соответствии со статьей 7 Закона Российской Федерации «О защите прав потребителей» и статьей 1 Федерального закона «О внесении изменений и дополнений в Закон Российской Федерации «О защите прав потребителей». Согласно этим законам объектом сертификации является электрическая энергия в распределительных сетях энергоснабжающих организаций, от которых она может подаваться потребителям (гражданам). Таким образом, вне области сертификации остается электрическая энергия в системах электроснабжения предприятий (юридических лиц), которые, с одной стороны,

являются главными источниками электромагнитных помех, а с другой стороны, несут значительный ущерб от несоответствия качества электроэнергии стандартным требованиям.

Нормативное ограничение состоит в том, что согласно Постановлению Госстандарта РФ от 14 августа 2001 года № 74 номенклатура показателей качества электроэнергии (ПКЭ), подлежащих подтверждению соответствия, ограничена двумя позициями: отклонением напряжения и отклонением частоты. Таким образом, важнейшие ПКЭ, среди которых — коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, оказались вне зоны обязательной сертификации электрической энергии, что противоречит положениям раздела 1 ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» и статье 542, второй части, Гражданского кодекса РФ.

Раздел 1 этого ГОСТа 13109-97 «Область применения» определяет, что нормы, установленные настоящим стандартом, являются обязательными во всех режимах работы систем электроснабжения общего назначения, кроме режимов, обусловленных форс-мажорными ситуациями. Эти нормы подлежат включению в технические условия на присоединение потребителей электрической энергии и в договоры на пользование электроэнергией между энергоснабжающими организациями и потребителями.

Статья 542 второй части Гражданского кодекса РФ устанавливает, что качество электрической энергии должно соответствовать требованиям, предусмотренным государственными стандартами.

Нормы ПКЭ по ГОСТ 13109-97 являются экономически обоснованными, поэтому их невыполнение наносит значительный ущерб экономике России.

Надо полагать, что отмеченное противоречие между сложившейся в настоящее время практикой обязательной сертификации электрической энергии и объективной сущностью этого понятия будет устранено в процессе поэтапного внедрения новых принципов правового регулирования в области требований к продукции, процессам производства и оценки соответствия, которые определены Федеральным законом РФ «О техническом регулировании» № 184-ФЗ от 27 декабря 2002 года [3].

Новые принципы правового и технического регулирования в электроэнергетике установлены Федеральным законом РФ «Об электроэнергетике» № 35-ФЗ от 26 марта 2003 года. [4].

В соответствии со статьей 28 указанного Закона качество электрической энергии относится к номенклатуре вопросов, по которым должны приниматься технические регламенты, а также осуществляться государственный надзор за их соблюдением согласно федеральному закону «О техническом регулировании» № 184-ФЗ от 27 декабря 2002 года.

Данный Закон устанавливает, что требования в части электромагнитной совместимости технических средств с окружающей средой являются обязательными и подлежат подтверждению соответствия на этапе подготовки продукции к выпуску на рынок. Указанное положение в полной мере распространяется на требования к электроэнергии, поскольку электрическая энергия является продукцией [5], то есть объектом технического регулирования.

Проблема повышения качества электроэнергии в электрических сетях России приобретает первостепенное значение в связи с предстоящим вступлением нашей страны во Всемирную торговую организацию (ВТО). Чтобы повысить конкурентоспособность отечественной продукции на российском и международных рынках в условиях интеграции России в ВТО, потребуется пересмотреть отношение к вопросам электромагнитной совместимости технических средств и, в частности, к повышению качества электроэнергии с позиции их соответствия международным стандартам. Поэтому документ Госстандарта РФ «Межведомственная программа мер по обеспечению выполнения в полном объеме требований Соглашения по техническим барьерам в торговле и Соглашения по применению санитарных и фитосанитарных мер Всемирной торговой организации на 2002–2005 годы» устанавливает, что разработка проекта технического регламента «Об электромагнитной совместимости» относится к числу первоочередных проектов законодательных и нормативных правовых актов, обеспечивающих реализацию положений указанного соглашения.

Наиболее массовым источником помех, влияющих на качество электроэнергии, являются силовые полупроводниковые преобразователи. Вместе с тем при создании электротехнических комплексов и систем на базе преобразовательной техники вопросы электромагнитной совместимости преобразова-

телей с питающей сетью часто рассматриваются как второстепенные, что приводит в большинстве случаев к невыполнению стандартных требований по качеству электроэнергии в питающих сетях.

Чтобы интенсифицировать продвижение проблемы повышения качества электроэнергии в системах электроснабжения России, необходимо анализировать вопросы электромагнитной совместимости преобразователей с питающей сетью на этапе проектирования электротехнических комплексов и систем и предусматривать в проектах средства, обеспечивающие соответствие качества электроэнергии стандартным требованиям. Для решения этой задачи целесообразно применять компьютерные методы расчета электронных схем.

В настоящей работе рассмотрена эффективная методология анализа влияния преобразователей на качество электроэнергии, которая поддерживается пакетом программ системы Design и позволяет корректно проводить гармонический анализ кривых тока и напряжения в электротехнических комплексах и системах, содержащих силовые полупроводниковые преобразователи, а также выбирать параметры фильтрокомпенсирующих устройств.

Материал работы базируется на исследованиях автора в области электромагнитной совместимости преобразователей с питающей сетью.

Данная работа может стать полезным методическим пособием для инженеров, занимающихся проектированием электрических сетей, питающих силовые полупроводниковые преобразователи.

Предполагается, что читатель настоящей работы знаком с операционной системой Windows и системой схемотехнического моделирования Design — PSpice.

Автор благодарит Шитова В. А. за участие в разработке элементной базы универсальной модели, предназначенной для исследования качества электроэнергии в цепях с преобразователями.

1. Общая характеристика методологии анализа влияния преобразователей на качество электроэнергии

Схемотехническое моделирование является современным инструментом для исследования электромагнитных процессов в электротехнических комплексах и системах.

Силовые полупроводниковые преобразователи относятся к классу электронных устройств, поэтому для исследования преобразователей широко применяются различные программы машинного анализа электронных схем.

Система Design разработана корпорацией MicroSim (модификации — Design Center [6], Design Lab [7]) и предназначена для проектирования печатных плат. Основу этой системы составляет созданная в Калифорнийском университете программа PSpice, которая в настоящее время считается эталонной про-

граммой схемотехнического моделирования электронных схем.

Для анализа схем силовых полупроводниковых преобразователей используются три программы из комплекта системы Design:

- Schematics — графический редактор, предназначенный для ввода исходных данных в виде принципиальной схемы электронного устройства и управления двумя другими программами;
 - PSpice — модуль моделирования, предназначенный для анализа схемы электронного устройства и вывода результатов анализа в текстовой форме;
 - Probe — графический постпроцессор, предназначенный для вывода и обработки результатов анализа в графической форме.
- К пакету системы Design прилагаются библиотеки графических символов и математических моделей компонентов, которые также используются при моделировании преобразователей.

Методология анализа влияния преобразователей на качество электроэнергии состоит из следующих главных этапов:

1. Графический ввод схемы электрической цепи в среде программы Schematics.
2. Задание параметров компонентов схемы в среде программы Schematics.
3. Задание спецификации библиотек и текстовых файлов, просматриваемых при составлении списка соединений компонентов схемы в среде программы Schematics.
4. Задание директив моделирования в среде программы Schematics.
5. Вызов из программы Schematics программы PSpice для расчета схемы.
6. Автоматический вызов из программы Schematics программы Probe для вывода результатов расчета.

Рассмотрим более подробно основы технологии каждого этапа на примере схемы, показанной на рис. 1, не вдаваясь в детали, изложенные в учебниках [6, 7].

Графический ввод схемы выполняется при помощи команд меню DRAW программы Schematics примерно в следующей последовательности. Вначале по команде DRAW/GET NEW PART на поле экрана из библиотек последовательно вводятся графические символы компонентов схемы. В частности, на схеме рис. 1 все графические символы, кроме символов трансформатора (TV) и трехфазной мостовой схемы (M1), взяты из штатных библиотек. Символы TV и M1 предварительно созданы [8, 9] и помещены в специальную библиотеку пользователя, откуда и перенесены на чертеж схемы. Условные обозначения символов назначаются автоматически, но могут редактироваться в режиме диалога.

После размещения всех компонентов схемы на поле экрана производится их соединение проводниками по команде DRAW/WIRE или шинами по команде DRAW/BUS. На рис. 1 использованы только соединения проводниками. На этом этапе ввода схемы заканчивается.

В отличие от чертежей схем, созданных в обычных графических редакторах, схема, созданная в среде программы Schematics,

кроме своего утилитарного назначения является носителем полного комплекта исходных данных для расчета ее характеристик. Данная информация закодирована в виде набора параметров компонентов — атрибутов, с помощью которых при вызове программы PSpice осуществляется передача всей информации, необходимой для моделирования схемы, из программы Schematics в программу Pspice, в частности указывается полный путь доступа к библиотекам моделей компонентов.

Простейший способ задания численных значений параметров схемы заключается в редактировании атрибутов предварительно выделенных компонентов по команде ATTRIBUTE меню EDIT. Другие способы будут рассмотрены ниже.

Задание спецификации библиотек и текстовых файлов, просматриваемых при составлении списка соединений компонентов схемы, выполняется по команде LIBRARY AND INCLUDE FILES меню ANALYSIS.

Задание директив моделирования, то есть выбор вида и параметров анализа цепи, производится по команде SETAP меню ANALYSIS. При этом открывается меню ANALYSIS SETAP, в котором в графе ENABLED выбирается директива вида анализа. В рассматриваемой задаче следует выбрать директиву TRANSIENT, которая соответствует расчету переходных процессов во временной области. Затем вызывается меню TRANSIENT, состоящее из двух меню: TRANSIENT ANALYSIS и FOURIER ANALYSIS. В меню TRANSIENT ANALYSIS устанавливаются численные значения временных параметров расчета переходного процесса: конечное время расчета и шаг вывода результатов расчета. В меню FOURIER ANALYSIS устанавливаются численные значения параметров спектрального анализа: частота основной гармоники и количество гармоник. Кроме того, в этом меню указываются координаты напряжения или тока, подлежащего спектральному анализу.

Спектральный анализ производится на интервале, равном периоду основной частоты. Данный интервал автоматически выбирается в конце интервала расчета переходного процесса.

Вызов из программы Schematics программы PSpice для расчета схемы производится по команде SIMULATE меню ANALYSIS.

После расчета переходного процесса автоматически вызывается программа Probe, которая выводит на экран графики напряжений и токов в точках схемы, помеченных маркерами на чертеже схемы. Кроме того, результаты гармонического анализа выбранной кривой напряжения или тока заносятся в виде таблицы в файл результатов расчета схемы с расширением .OUT, который вызывается для просмотра по команде EXAMINE OUTPUT меню ANALYSIS. В этой таблице указываются абсолютные и относительные значения амплитуд гармонических составляющих заданных кривых напряжения или тока и коэффициент искажения синусоидальной соответствующих кривых.

Так в общих чертах выглядит методология анализа влияния преобразователей на каче-

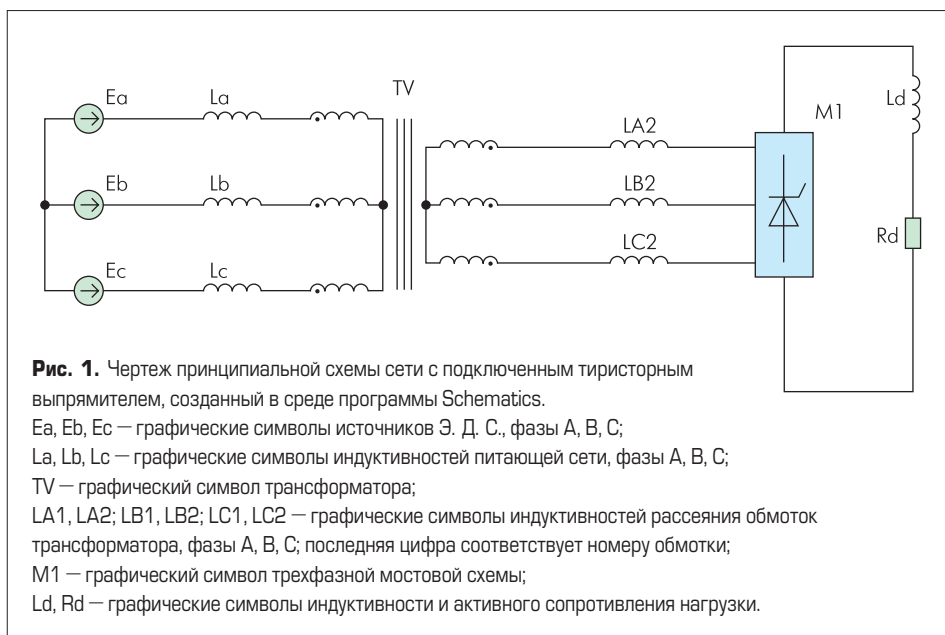


Рис. 1. Чертеж принципиальной схемы сети с подключенным тиристорным выпрямителем, созданный в среде программы Schematics.

Ea, Eb, Ec — графические символы источников Э. Д. С., фазы A, B, C;
La, Lb, Lc — графические символы индуктивностей питающей сети, фазы A, B, C;
TV — графический символ трансформатора;
LA1, LA2; LB1, LB2; LC1, LC2 — графические символы индуктивностей рассеяния обмоток трансформатора, фазы A, B, C; последняя цифра соответствует номеру обмотки;
M1 — графический символ трехфазной мостовой схемы;
Ld, Rd — графические символы индуктивности и активного сопротивления нагрузки.

ство электроэнергии, основанная на применении системы Design.

Особенности моделирования силовых полупроводниковых преобразователей в системе Design обусловлены следующими обстоятельствами.

В системе Design предметом автоматизированного проектирования является слаботочное электронное устройство — радиотехническая печатная плата в комплекте с активными и пассивными компонентами схемы этого устройства. При разработке реальной конструкции печатной платы необходимо оценивать влияние дестабилизирующих факторов на функциональные характеристики проектируемого устройства. Поэтому библиотечные модели компонентов в системе Design содержат большое количество параметров. Например, модели диодов учитывают около тридцати параметров, модели транзисторов — около пятидесяти параметров, что определяет высокий порядок систем уравнений, описывающих данные компоненты. Отсюда возникают сложности при расчете схемы, так как решение часто не сходится, если устройство содержит много полупроводниковых приборов.

Чтобы ослабить влияние проблемы сложности решения на процедуру анализа электромагнитных процессов в электрических цепях, содержащих силовые полупроводниковые преобразователи, целесообразно применять более простые модели силовых полупроводниковых приборов. При этом уровень идеализации моделей должен соответствовать техническим требованиям к результатам решаемой задачи. Так, для рассматриваемой задачи достаточно представить полупроводниковый прибор в виде нелинейного сопротивления, параметры которого изменяются по определенному логическому закону. Например, биполярный транзистор можно имитировать нелинейным сопротивлением, величина которого близка к нулю при положительном значении напряжения между эмиттером и коллектором и одновременно наличии управляющего импульса.

При отсутствии управляющего импульса значение этого сопротивления велико независимо от полярности напряжения между эмиттером и коллектором.

Аналогичные алгоритмы, отражающие ключевые свойства полупроводниковых приборов, можно предложить для всех приборов.

Другим фактором, ограничивающим прямое применение системы Design для анализа преобразователей, является отсутствие в штатной библиотеке системы Design символов типовых компонентов, применяемых в преобразовательной технике: многообмоточных трансформаторов, мостов, систем управления и т. д. Последнее ограничение можно преодолеть, применяя технологию разработки новых графических символов и макромодели.

В данной работе наряду с максимальным использованием универсальной технологии системы Design, позволяющей моделировать любую электронную схему на основе собственных штатных библиотек компонентов, основное внимание было уделено разработке специальных графических символов и макромодели функциональных блоков, отражающих особые свойства основных компонентов средств силовой преобразовательной техники. Указанное обстоятельство снижает вероятность ошибок при разработке схем сложных электротехнических комплексов на базе преобразователей в сравнении с методикой, основанной на прямом применении моделей из штатных библиотек системы Design, и повышает продуктивность работы пользователя за счет сокращения машинного времени на вычисления.

2. Понятие о технологии макромоделирования в среде системы Design

2.1. Общие сведения о технологии макромоделирования

Графические символы компонентов в системе Design имеют три составляющие:

- чертеж графического символа;

- перечень параметров или атрибутов — по терминологии, принятой в описаниях системы Design;
- текстовое описание модели компонента.

Чертеж графического символа является формализованным обозначением компонента электрической схемы, который выводится на экран монитора в среде программы Schematics при его выборе из библиотеки графических символов.

Перечень атрибутов графического символа осуществляет вывод информации о компоненте на чертеж схемы в среде программы Schematics и передачу информации о компоненте в программу PSpice. Вывод атрибутов графического символа на экран монитора для просмотра и частичного редактирования выполняется в среде программы Schematics по команде ATTRIBUTE меню EDIT или двойным щелчком мышкой по графическому символу.

Текстовое описание модели компонента (далее — модель) на языке программы PSpice является математическим описанием характеристик компонента.

Библиотеки графических символов компонентов и их моделей входят в комплект системы Design. Тексты библиотечных моделей большей частью не доступны для редактирования. Поэтому нельзя получить упрощенную модель компонента, например, полупроводникового прибора, путем прямого редактирования текстового описания модели.

Вместе с тем предусмотренная в системе Design технология описания схемы на языке программы PSpice в сочетании с процедурами редактирования чертежа графического символа и его атрибутов позволяет решать указанную задачу путем создания новых графических символов. Новые графические символы обычно размещают в отдельных библиотеках, формируемых пользователем.

Макромоделью по терминологии системы Design называется текстовое описание электрической цепи на языке программы PSpice, которое базируется на штатных моделях системы Design и составляется по определенным правилам.

При создании нового графического символа целесообразно вначале разработать его макромодель, то есть алгоритм и математическое описание физических функций компонента, которому будет соответствовать данный графический символ, а затем создавать его чертеж и список атрибутов, так как эти процедуры являются чисто формальными. Макромодель большей частью используется в качестве модели нового графического символа, но может также входить в состав более сложной макромодели. Примеры реализации обоих вариантов показаны ниже.

2.2. Структура макромодели

Структура, или описание, макромодели на языке программы PSpice составляется в любом текстовом редакторе и состоит из предложений.

Предложением называется описание директивы моделирования или компонента.

Каждое предложение размещается на отдельной строке. Если символы предложения не помещаются на одной строке, разрешается процедура переноса или продолжения строки. Строка продолжения начинается с символа «+» в первой позиции.

В структуре макромодели разрешены также строки текстовых комментариев, которые начинаются с символа «*».

Директива моделирования есть предложение, которое начинается с символа «.» в первой позиции.

Описание макромодели начинается с директивы «.SUBCKT» и заканчивается директивой «.ENDS». Между этими директивами размещаются предложения, соответствующие описаниям компонентов макромодели на языке программы PSpice.

Синтаксис директивы «.SUBCKT» имеет вид:

.SUBCKT <имя макромодели> <список маркировок внешних узлов, которые соответствуют выводам графического символа>. Данная синтаксическая форма директивы «.SUBCKT» включает только обязательные элементы описания, заключенные в скобки <...>. После обязательных элементов описания допускается вводить другие элементы, например описание параметров схемы, как будет показано ниже на примерах.

Синтаксис директивы «.ENDS» имеет вид: «.ENDS» [имя макромодели]. Имя макромодели не является обязательным элементом синтаксиса данной директивы, что условно показано квадратными скобками. Однако обычно применяется полная форма данной директивы, так как текстовые описания макромодели разных компонентов помещаются в один файл с расширением **.txt**, например **user_model.txt**, который создается пользователем. Со временем в этом файле накапливается большое количество текстов, поэтому для удобства просмотра текстов рекомендуется каждое описание заканчивать директивой с именем макромодели.

Продолжение следует

Литература

1. Кудрявый В. В. Перспективы развития электроэнергетики России // Электро. 2003. № 1.
2. Карташов И. И., Пономаренко И. С., Тульский В. Н., Шамонов Р. Г., Масленников Г. К., Васильев В. В. Качество электрической энергии в муниципальных сетях Московской области // Промышленная энергетика. 2002. № 8.
3. Федеральный закон РФ «О техническом регулировании» № 184-ФЗ от 27 декабря 2002 года // Российская газета. 31 декабря 2002. № 245 (3113).
4. Федеральный закон РФ «Об электроэнергетике» № 35-ФЗ от 26 марта 2003 года // Российская газета. 1 апреля 2003. № 60 (3174).
5. Правила по сертификации. Система сертификации ГОСТ Р. О внесении изменений и дополнений в правила проведения сертификации электрооборудования. Утвержде-

ны Постановлением Госстандарта России № 1 от 3 января 2001 года.

6. Разевиг В. Д. Система схемотехнического моделирования и проектирования печатных плат Design Center (PSpice). М.: СК Пресс, 1996.
7. Разевиг В. Д. Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab 8.0. М.: Солон, 1999.
8. Добрусин Л. А., Шитов В. А. Модели трансформаторов для анализа силовых полупроводниковых преобразователей в системе Design. Электротехника 2010. VI симпозиум. Сборник докладов. Том III. М.: ВЭИ — ТРАВЭК, 2001.
9. Добрусин Л. А., Шитов В. А. Логическая модель тиристора для анализа силовых полупроводниковых преобразователей в системе Design. Электротехника 2010. VI симпозиум. Сборник докладов. Том III. М.: ВЭИ — ТРАВЭК, 2001.
10. Добрусин Л. А., Шитов В. А. Макромодель системы управления преобразователем. Электротехника 2010. VII симпозиум. Сборник докладов, том I. — М.: ВЭИ — ТРАВЭК, 2003.
11. Добрусин Л. А., Шитов В. А. Макромоделирование сложных преобразователей // Электро. 2002. № 6.
12. Добрусин Л. А. Многомостовые преобразователи в электроэнергетике XXI века. Электротехника 2010. V симпозиум. Сборник докладов, том II. М.: ВЭИ — ТРАВЭК, 1999.
13. Добрусин Л. А. Фильтрокомпенсирующие устройства для преобразовательной техники. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2003.
14. Добрусин Л. А. Автоматизация расчета гармоник в электрических сетях, питающих преобразователи // Промышленная энергетика, 2003. № 4.
15. Kimbark E. W. Direct current transmission. Wiley interscience, 1971.
16. Добрусин Л. А. Универсальная модель для исследования качества электроэнергии в цепях с преобразователями. Электротехника 2010. VII симпозиум. Сборник докладов, том I. М.: ВЭИ — ТРАВЭК, 2003.
17. Добрусин Л. А. Методология и библиотека моделей для анализа влияния преобразователей на качество электроэнергии // Электро. 2003. № 5.
18. Добрусин Л. А. Выбор способа ограничения добротности силового индуктивно-емкостного фильтра // Электротехника. 1984. № 5.
19. Добрусин Л. А. Особенности моделирования преобразователей в среде системы Design. Электротехника 2010. VII симпозиум. Сборник докладов, том I. М.: ВЭИ — ТРАВЭК, 2003.
20. Добрусин Л. А. Широкополосные фильтрокомпенсирующие устройства для тиристорных преобразователей // Электричество. 1985. № 4.
21. Добрусин Л. А. Автоматизация расчета фильтрокомпенсирующих устройств для электрических сетей, питающих преобразователи // Промышленная энергетика. 2004. № 5.