

Продолжение. Начало в № 3'2005

Моделирование влияния преобразователей на сеть

в среде системы Design — PSpice

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

antaniija@vei.ru

3.6. Графические символы и макромоделли фильтрокомпенсирующих устройств

Фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ) предназначены для компенсации реактивной мощности и фильтрации гармоник тока и напряжения на входе и выходе силовых полупроводниковых преобразователей (СПП). ФКУ являются неотъемлемой частью электротехнических комплексов и систем, содержащих СПП, так как процесс преобразования параметров электрической энергии объективно сопровождается потреблением реактивной мощности из питающей сети, искажением формы кривых тока и напряжения на входе и выходе преобразователя.

Технические требования к входным ФКУ определяют, в основном, два документа:

1. ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». Этот документ устанавливает показатели и нормы качества электрической энергии в электрических сетях систем электроснабжения переменного трехфазного и однофазного тока частотой 50 Гц в точках, к которым присоединяются электрические сети, находящиеся в собственности различных потребителей электрической энергии, или приемники электрической энергии.
2. Технические условия на присоединение потребителей электрической энергии в части требований электроснабжающей организации по компенсации реактивной мощности.

Технические требования к выходным ФКУ должны устанавливаться в технических условиях на преобразователь.

Как в первом, так и во втором случае выбор схемы и параметров ФКУ должен проводиться на основе результатов анализа электромагнитных процессов в электротехнической системе, содержащей СПП, и гармонического анализа формы кривых тока и напряжения на входе и выходе СПП. Поэтому при создании универсальных моделей, предназначенных для решения таких задач, необходимо в комплекте библиотеки компонентов преобразователя иметь модели схем ФКУ.

В настоящей работе рассмотрены графический символ и макромоделли ФКУ, входящие в библиотеку компонентов универсальной модели для исследования качества электроэнергии в цепях с преобразователями [16, 17].

Основная схема ФКУ, которая применяется в силовой преобразовательной технике, представляет собой комбинацию резонансных цепей — фильтров, настроенных на частоты гармоник тока преобразователя. Различают узкополосные и широкополосные фильтры. При этом узкополосный фильтр можно представить как частный случай широкополосного [18]. Поэтому в качестве базовой схемы для модели ФКУ принят широкополосный фильтр (рис. 41).

Базовая макромоделли ФКУ — однофазный широкополосный фильтр второго порядка — построена на основе встроенных моделей одной из штатных библиотек системы Design: резистора, конденсатора и индуктивности.

Путем вариации параметров базовой макромоделли ФКУ можно настраивать эту схему на любую частоту, задавать любую реактивную мощность на основной частоте, превращать широкополосный фильтр в узкополосный фильтр.

Для моделирования трехфазных ФКУ можно использовать один из двух приемов:

1. Моделирование необходимой схемы ФКУ в среде графического редактора — программы Schematics — с помощью графического символа однофазной базовой макромоделли ФКУ.
2. Составление текстового описания макромоделли трехфазной схемы ФКУ на языке программы PSpice с последующим созданием графического символа данной схемы, который поддерживается указанным текстовым описанием.

Второй вариант более целесообразен, так как способствует увеличению скорости решения задачи.

Текстовое описание макромоделли трехфазной схемы ФКУ выполнено на основе текстового описания однофазной схемы.

Текстовое описание макромоделли однофазной схемы ФКУ, соответствующей рис. 41, на языке программы PSpice имеет следующий вид:

```
.SUBCKT RCL_D 1 2
+ PARAMS: R=37.5 C=6u L=0.627m
```

- * .SUBCKT — директива начала описания макромоделли;
- * RCL_D — имя макромоделли;
- * 1, 2 — маркировки выводов схемы;
- * PARAMS: — ключевое слово, после которого приводится перечень параметров макромоделли по умолчанию: R = 37,5 Ом, C = 6 мкФ, L = 0,627 мГн.

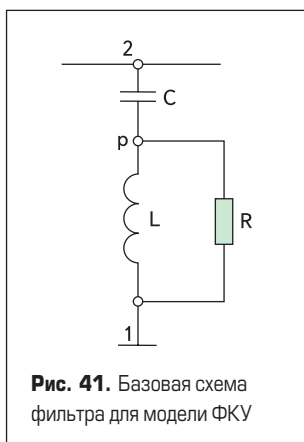


Рис. 41. Базовая схема фильтра для модели ФКУ

```
R_RCL 1 p {R}
C_RCL p 2 {C}
L_RCL 1 p {L}
```

- * Три предложения, описывающие включение компонентов в схему по рис. 1 и их параметры:
- * R_RCL, C_RCL, L_RCL — имена компонентов;
- * 1, p, 2 — маркировки узлов, между которыми включены соответствующие компоненты;
- * {R}, {C}, {L} — идентификаторы параметров R, C, L, предназначенные для изменения параметров в режиме диалога с экрана монитора.

```
.ENDS RCL_D
```

- * .ENDS — директива окончания описания макромодели;
 - * RCL_D — имя макромодели.
- Трехфазная схема ФКУ представляет собой три однофазные схемы ФКУ, соединенные в «треугольник».
- Текстовое описание макромодели трехфазной схемы ФКУ на языке программы PSpice имеет следующий вид:

```
.SUBCKT F1 A B C PARAMS:
+ VALUE_CF=6u VALUE_RF=15 VALUE_LF=0.1m
```

- * .SUBCKT — директива начала описания макромодели;
- * F1 — имя макромодели;
- * A B C — маркировки выводов схемы;
- * VALUE_CF=6u; VALUE_RF=15; VALUE_LF=0.1m — значения параметров схемы, заданные по умолчанию.

```
X_RCL1 A B RCL_D PARAMS:
+ C={VALUE_CF} R={VALUE_RF} L={VALUE_LF}
X_RCL2 B C RCL_D PARAMS:
+ C={VALUE_CF} R={VALUE_RF} L={VALUE_LF}
X_RCL3 C A RCL_D PARAMS:
+ C={VALUE_CF} R={VALUE_RF} L={VALUE_LF}
```

- * Три предложения, описывающие соединение трех однофазных схем ФКУ в одну трехфазную схему:
- * X_RCL1, X_RCL2, X_RCL3 — имена компонентов трехфазной схемы, представленных в форме макромодели однофазной схемы, о чем свидетельствует первый символ в имени компонента (X);
- * A, B, C — маркировки узлов, между которыми включены соответствующие компоненты;
- * RCL_D — имя макромодели однофазной схемы.
- * {VALUE_RF}, {VALUE_CF}, {VALUE_LF} — идентификаторы значений параметров RF, CF, LF, предназначенные для изменения параметров в режиме диалога с экрана монитора.

```
.ENDS F1
```

- * .ENDS — директива окончания описания макромодели;
 - * F1 — имя макромодели.
- Описание списка атрибутов графического символа трехфазной схемы ФКУ имеет следующий вид:

```
PART = F_1
```

- * PART — шаблон имени символа компонента, под которым он заносится в библиотеку символов;
- * F_1 — имя символа компонента.

```
PKGREF = F_1
```

- * PKGREF — шаблон позиционного обозначения компонента;
- * 1 — позиционное обозначение компонента на чертеже схемы, созданной в программе Schematics;
- * F_1 — имя компонента.

```
REFDES = F_1
```

- * REFDES — шаблон префикса условного обозначения компонента;
- * F — префикс условного обозначения компонента на чертеже схемы, созданной в программе Schematics;
- * F_1 — имя компонента.

```
TEMPLATE=X ^ @ REFDES %A %B %C @MODEL
+ PARAMS: VALUE_CF = {CF1}
+ VALUE_RF = {RF1} VALUE_LF = {LF1}
```

- * TEMPLATE — шаблон для назначения соответствий графических выводов компонента с их реальным физическим смыслом и задания параметров компонента;
- * X — символ имени компонента, соответствующий макромодели;
- * ^ — знак, который в процессе работы системы Design заменяется указанием полного пути доступа к компоненту;
- * @ — знак, указывающий на то, что следующий за ним шаблон в процессе работы системы Design заменяется его именем;
- * % — знак, предваряющий имя вывода компонента;

- * MODEL — шаблон, обозначающий наличие описания модели или макромодели компонента;
- * PARAMS: VALUE_CF = {CF1} VALUE_RF = {RF1} VALUE_LF = {LF1} — шаблон, с помощью которого вводятся параметры в режиме диалога.

```
MODEL = F_1
```

- * MODEL — шаблон имени модели или макромодели компонента;
 - * F_1 — имя макромодели компонента.
- Технология диалога для редактирования параметров компонентов схемы ФКУ — резистора, конденсатора и индуктивности — реализована путем применения идентификаторов, которые введены в текст макромодели ФКУ и в атрибуты шаблона TEMPLATE ее графического символа на этапе их создания. Вариация значений параметров, представленных идентификаторами, производится в среде программы Schematics с помощью атрибутов графического символа PARAM.

Чертеж графического символа фильтрокомпенсирующего устройства и вид панели его атрибутов показаны на рис. 42. В окне редактирования видна часть шаблона TEMPLATE, начиная с ключевого слова PARAMS.

Пример 6. Моделирование влияния на питающую сеть тиристорного выпрямителя, выполненного по трехфазной мостовой схеме.

Рассмотрим пример моделирования влияния на питающую сеть тиристорного выпрямителя, выполненного по трехфазной мостовой схеме с целью выбора параметров ФКУ. Функциональная схема модели, созданная в среде программы Schematics на основе рассмотренных выше графических символов, показана на рис. 43. Условные обозначения: ALFHA — угол управления, градусы;

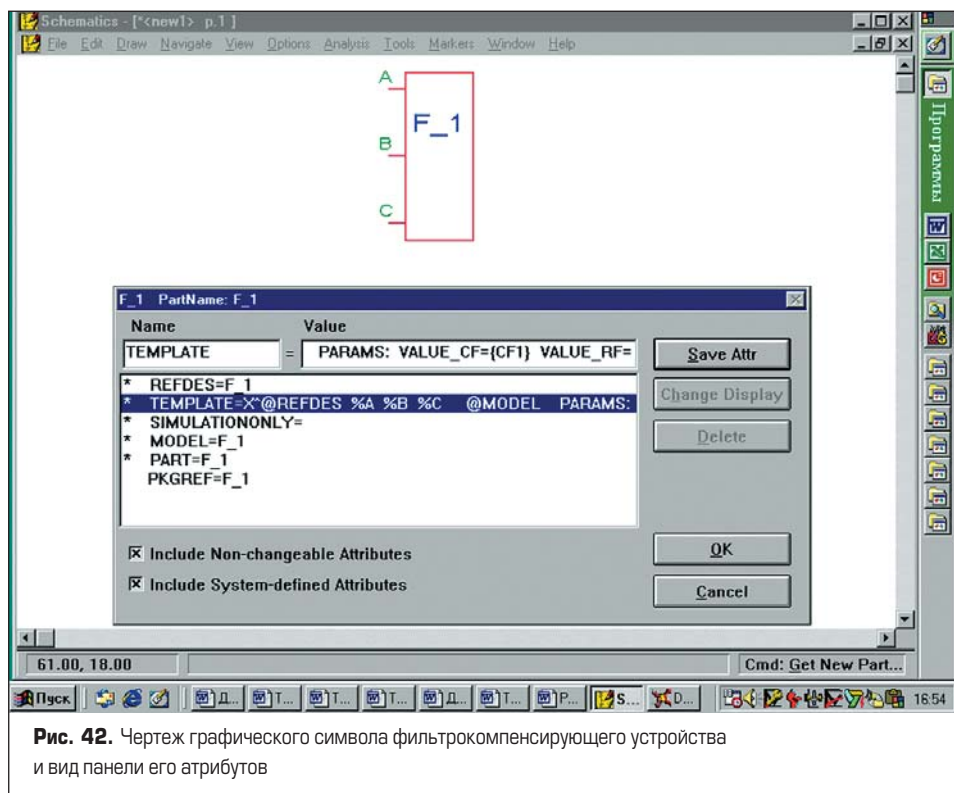


Рис. 42. Чертеж графического символа фильтрокомпенсирующего устройства и вид панели его атрибутов

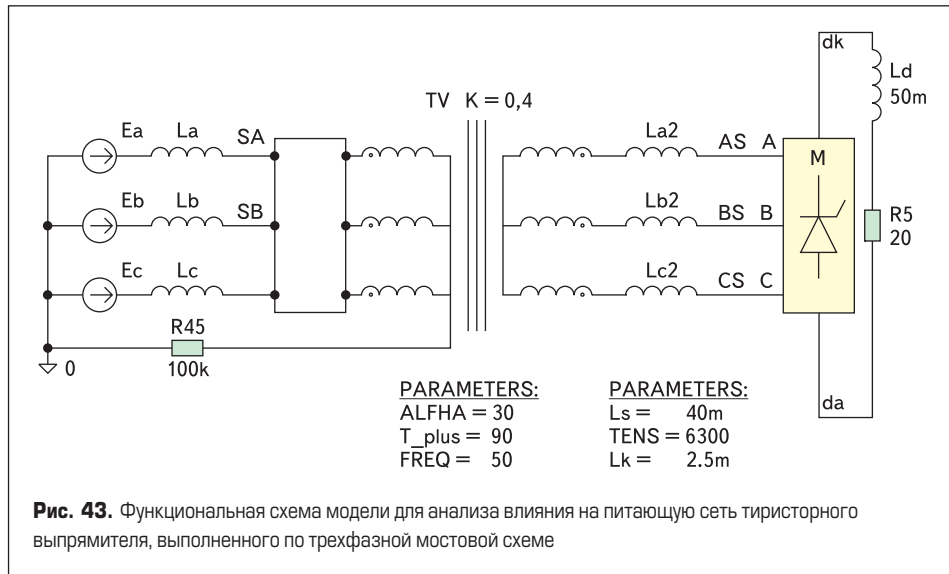


Рис. 43. Функциональная схема модели для анализа влияния на питающую сеть тиристорного выпрямителя, выполненного по трехфазной мостовой схеме

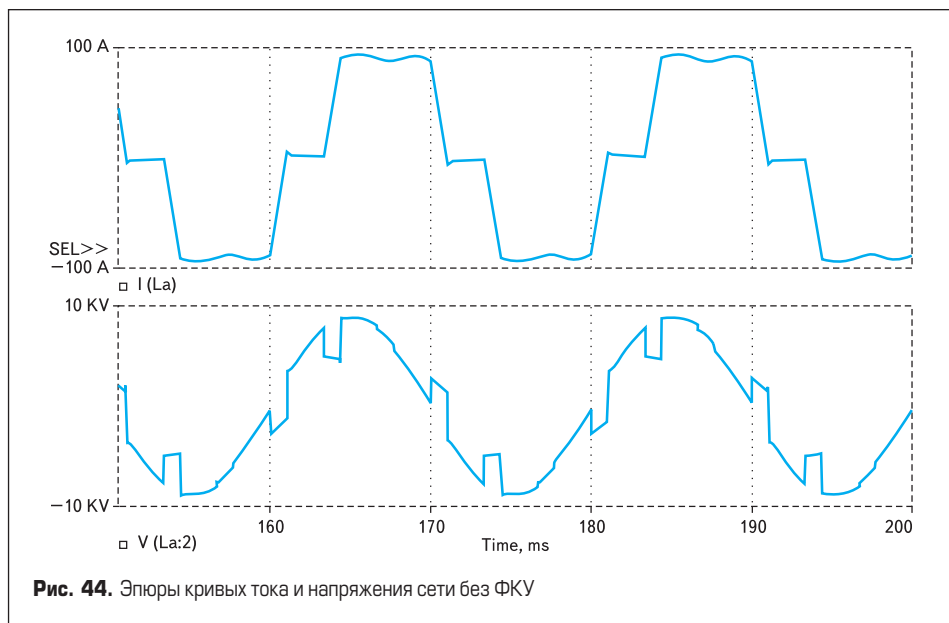


Рис. 44. Элюры кривых тока и напряжения сети без ФКУ

T_puls — длительность импульса управления; FREQ — частота, Гц; Ls — индуктивность сети, мГн; Lk — индуктивность рассеяния трансформатора, мГн; TENS — действующее значение фазного напряжения источника питания, В; K — коэффициент трансформации.

Параметры схемы выбраны таким образом, чтобы обеспечить существенное искажение формы кривой питающего напряжения сети (коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения U(La:2) — 22,7%), если не применять ФКУ (рис. 44).

ФКУ на рис. 43 исполнено в виде иерархического символа — блока ФКУ, функциональная схема блока ФКУ показана на рис. 45. В данном случае модель ФКУ представляет собой шесть графических символов трехфазной схемы ФКУ, соединенных параллельно.

Параметры фильтров ФКУ, указанные на рис. 45, реализуют схему ФКУ, состоящую из четырех узкополосных фильтров с добротностью 30, настроенных на пятую, седьмую, одиннадцатую, тринадцатую гармоники (F1–F4 — соответственно) и широкополосного фильтра с добротностью 1 (F5).

Форма кривых тока и напряжения сети для схемы, показанной на рис. 43, при подключенном ФКУ приведена на рис. 46. При этом вы-

полняется норма ГОСТ 13109-97 по несинусоидальности напряжения сети (коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения U(La:2) — 4,87%) и обеспечивается зна-

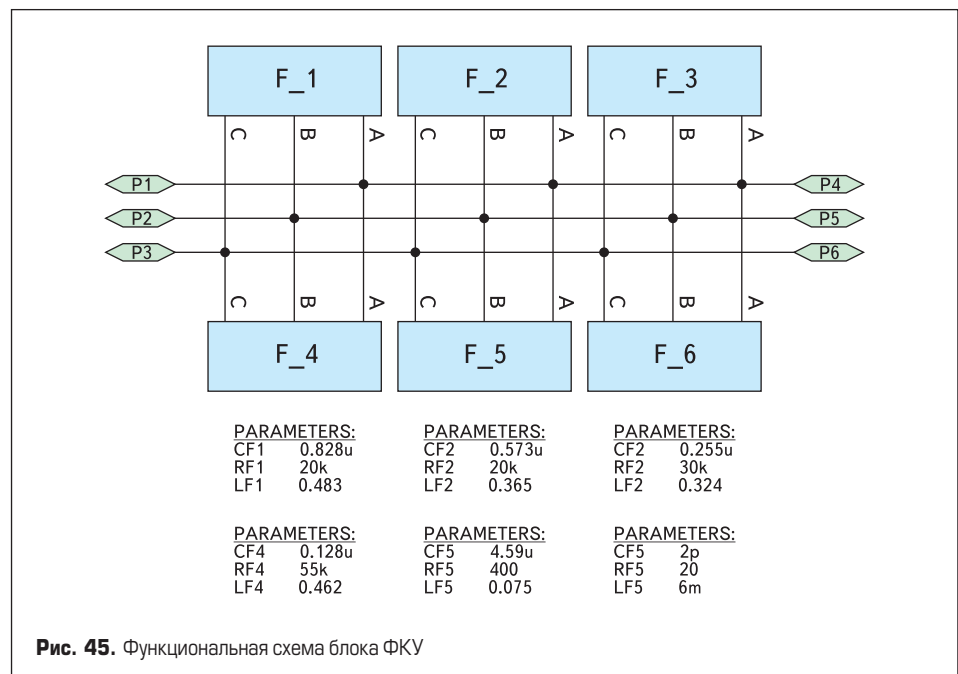


Рис. 45. Функциональная схема блока ФКУ

чение коэффициента сдвига основной гармоники тока относительно основной гармоники напряжения на входе преобразователя равно единице.

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 «О техническом регулировании» № 184-ФЗ от 27 декабря 2002 года. // Российская газета. 31 декабря 2002 г. № 245 (3113).
4. Федеральный закон Российской Федерации «Об электроэнергетике» № 35-ФЗ от 26 марта 2003 года. // Российская газета. 1 апреля 2003 г. № 60 (3174).
5. Правила по сертификации. Система сертификации ГОСТ Р. О внесении изменений и дополнений в правила проведения сертификации электрооборудования. Утверждены 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 — ТРАВЕК. 2001.
9. Добрусин Л. А., Шитов В. А. Логическая модель тиристора для анализа силовых полупроводниковых преобразователей в системе Design // Электротехника 2010. VI сим-

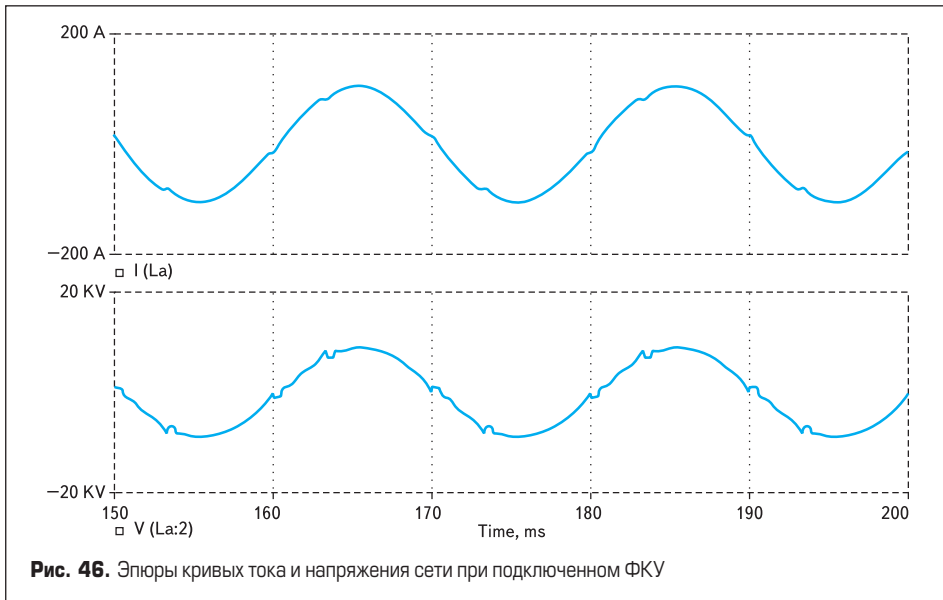


Рис. 46. Эпюры кривых тока и напряжения сети при подключенном ФКУ

познум. 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.