

Окончание. Начало в № 3'2005

# Моделирование влияния преобразователей на сеть

## в среде системы Design — PSpice

**Леонид Добрусин,  
Д. Т. Н.,  
академик АЭН РФ**

antanija@vei.ru

### 4. Универсальная модель для исследования качества электроэнергии в цепях с преобразователями

#### 4.1. Общие сведения

Универсальная модель для исследования качества электроэнергии в цепях с преобразователями создана на основе специализированных графических символов и макромоделей компонентов преобразовательной техники, рассмотренных ранее. Модель предназначена для анализа электромагнитных процессов и гармонического анализа кривых тока и напряжения в электротехнических комплексах и системах, содержащих силовые полупроводниковые преобразователи.

Модель поддерживается пакетом программ системы Design.

В комплект модели входят следующие графические символы и макромоделей компонентов преобразователей:

1. Графические символы и макромоделей многообмоточных трансформаторов.
2. Графические символы и логические макромоделей силовых полупроводниковых приборов.
3. Графические символы и макромоделей трехфазных мостовых схем.
4. Графические символы и макромоделей фильтрокомпенсирующих устройств.
5. Графические символы и макромоделей систем управления.

Кроме того, при моделировании преобразователей используются графические символы компонентов из штатных библиотек системы Design, например символы источников напряжения и тока, индуктивности, емкости, активного сопротивления и т. д., которые поддерживаются встроенными моделями системы Design.

Универсальность модели определяют следующие ее характеристики:

1. Возможность моделирования силовых полупроводниковых преобразователей в основном на базе специализированных графических символов и макромоделей преобразовательной техники, что значительно упрощает процедуру составления и отладку моделей в среде программы Schematics, а также сокращает время расчета за счет уменьшения объема вычислений, затраченных на составление списка соединений элементов схемы.

2. Применение технологии диалога для редактирования параметров главных компонентов схемы преобразователя. Технология диалога реализована путем задания основных параметров графических символов в виде идентификаторов, которые вводятся в список атрибутов символов и в текстовые описания макромоделей на этапе их создания. Вариация значений этих идентификаторов производится с помощью атрибутов графического символа PARAM. К числу главных параметров относятся: значения напряжения, тока, частоты источников питания; значение частоты следования импульсов системы управления; значение длительности импульса системы управления; значение угла управления преобразователя; параметры всех пассивных элементов схемы.
3. Широкие возможности вывода результатов анализа схемы преобразователя, которые могут представляться в текстовой и графической форме на основе использования стандартного интерфейса системы Design.

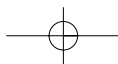
4. Специальные меры для обеспечения сходимости решения задач.

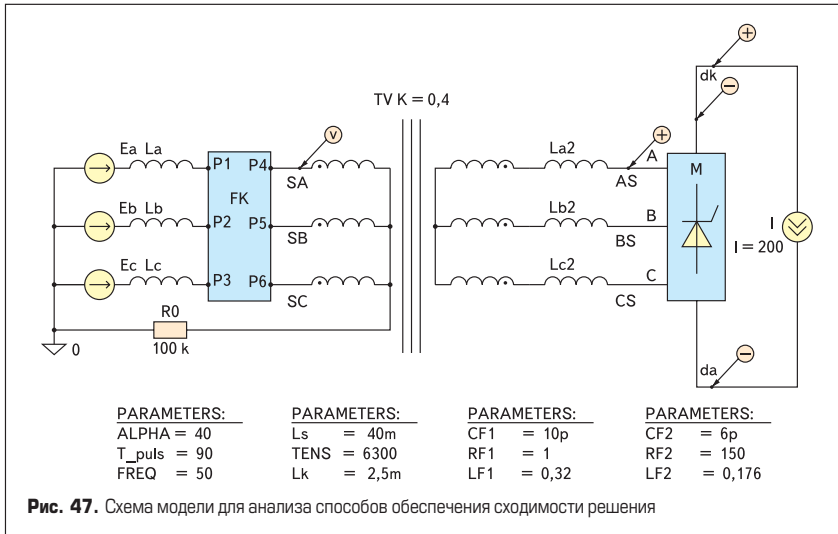
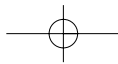
Достоинство данной модели состоит в том, что при ее создании основное внимание было уделено разработке графических символов и макромоделей функциональных блоков, отражающих особые свойства основных компонентов силовой преобразовательной техники, и специальных способов, обеспечивающих сходимость решения задач. Указанное обстоятельство уменьшает вероятность ошибок при разработке схем сложных преобразователей в сравнении с методикой, основанной на прямом применении моделей из штатных библиотек системы Design, и повышает продуктивность работы исследователя.

#### 4.2. Способы обеспечения сходимости решений при моделировании преобразователей в среде системы Design

Моделирование сложных силовых полупроводниковых преобразователей в среде системы Design в отдельных случаях сопровождается отсутствием сходимости решения. При этом система диагностики программы PSpice выдает сообщение о том, что выполнение программы расчета прекращено вследствие ошибок при составлении схемы модели, и рекомендует обратиться к выходному файлу с расширением .out за подробностями.

Экспериментально установлены типичные случаи, при которых может наблюдаться отсутствие сходимости решения [19]:





1. Программа прекращает работу на этапе расчета начальных условий, то есть начальных узловых потенциалов и начальных токов независимых источников напряжений.
2. Программа начинает нормально работать, но затем прекращает расчеты и выдает аналогичную диагностику. Такой случай может наблюдаться, когда одновременно заданы два вида анализа: расчет переходных процессов и гармонический анализ.
3. Программа перестает работать при изменении параметров схемы в среднем на порядок, когда необходимо произвести исследование режимов работы схемы в широком диапазоне изменения параметров.

Анализ перечня ошибок, которые приводятся в файле с расширением .out, показывает следующее.

В первом случае причиной отсутствия сходимости решения являются не ошибки в схеме, а неспособность программы вычислить начальные условия в некоторых узлах схемы. Например, при моделировании типичных преобразователей, выполненных на основе трехфазных мостовых схем, к этим узлам чаще всего относится анод и катод трехфазной мостовой схемы, выводы управляющих электродов полупроводниковых приборов, то есть узлы схемы, отделенные от источников питания полупроводниковыми приборами. Будем называть эти узлы критическими точками.

Во втором случае причиной отсутствия сходимости решения является переход программы в режим работы с очень малыми значениями шага интегрирования вследствие затруднений с вычислением значений параметров процесса в очередной точке, что приводит к уменьшению значения шага интегрирования ниже допустимой нормы и в результате к аварийному останovu программы.

В третьем случае причиной отсутствия сходимости решения большей частью также является уменьшение шага интегрирования ниже допустимой нормы.

Указанные обстоятельства свидетельствуют о том, что программа PSpice слабо приспособлена для анализа схем, процессы в которых описываются с помощью разрывных функций, что является характерной особенностью

описания электромагнитных процессов в схемах силовых полупроводниковых преобразователей.

Экспериментальные исследования кривых тока и напряжения в схемах преобразователей, проведенные с помощью программы Probe в целях определения режимов модели, которые приводят к сбою решения, показали, что все нарушения в работе программы происходят в моменты подачи управляющих импульсов на полупроводниковые приборы силовой схемы.

Отмеченные замечания относятся к математическому методу решения задачи и в принципе должны устраняться путем модернизации программы PSpice. Однако, принимая во внимание, что практически данный путь решения задачи нереализуем, разработаны и апробированы приемы, которые обеспечивают сходимость решения при моделировании силовых полупроводниковых преобразователей в среде системы Design. Эти приемы внешне аналогичны методам и средствам, которые применяются для защиты силовых полупроводниковых приборов от коммутационных перенапряжений, поэтому условно их можно назвать «схемотехническими». Так, для того чтобы решить задачу вычисления начальных условий, можно вводить в схему резисторы, подключаемые параллельно полупроводниковым приборам. Значения сопротивлений этих резисторов должны выбираться таким образом, чтобы токи в них были пренебрежимо малы в сравнении с токами основной силовой схемы преобразователя. Другой прием состоит в том, что критические точки соединяются с глобальным нулем модели. Определенный эффект дает ввод в модель RC-цепей.

Целесообразность применения того или другого приема определяется экспериментально в процессе отладки модели.

Покажем различные способы включения демпфирующих цепей, обеспечивающих сходимость решения задачи, на примере универсальной модели, предназначенной для исследования влияния на питающую сеть трехфазного мостового тиристорного преобразователя.

Схема модели показана на рис. 47.

Демпфирующие цепи, обеспечивающие сходимость решения задачи в различных режимах, вводятся либо в текстовое описание макромодели, поддерживающих графические символы компонентов схемы, либо в виде специального текстового файла, присоединенного к текстовому описанию модели как ее обязательный элемент.

В модели, приведенной на рис. 47, применены оба способа включения демпфирующих цепей.

Первый способ можно применять на этапе создания текстовых описаний макромодели трехфазной мостовой схемы и трансформатора, например, .SUBCKT Most\_500\_ISOL и .SUBCKT TV\_3f\_m1:

```
.SUBCKT Most_500_ISOL A B C da dk
+ PARAMS: VALUE_ALPHA=30 ALUE_TETA_0=30
+ VALUE_FREQ=500
X_VS1 A G1 dk SCR_m2_9
X_VS2 da G2 C SCR_m2_9
X_VS3 B G3 dk SCR_m2_9
X_VS4 da G4 A SCR_m2_9
X_VS5 C G5 dk SCR_m2_9
X_VS6 da G6 B SCR_m2_9
X1 A dk RC PARAMS: R=1000 C=0.1u
X3 B dk RC PARAMS: R=1000 C=0.1u
X5 C dk RC PARAMS: R=1000 C=0.1u
X4 A da RC PARAMS: R=1000 C=0.1u
X6 B da RC PARAMS: R=1000 C=0.1u
X2 C da RC PARAMS: R=1000 C=0.1u
XC51 dk G1 C G2 dk G3 A G4
dk G5 B G6
+ System_a1_500_ISOL
+ PARAMS: Tu=75 T0=(VALUE_TETA_0)
+ A=(VALUE_ALPHA) Fr=(VALUE_FREQ)
.ENDS Most_500_ISOL

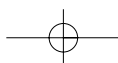
.SUBCKT TV_3f_m1 A1 B1 C1 p0
+ GA1 A1 p0 VALUE=[K*I(VA21)]
+ GB1 B1 p0 VALUE=[K*I(VB21)]
+ GC1 C1 p0 VALUE=[K*I(VC21)]
+ EA21 p1A21 p021 VALUE=[K*V(A1,p0)]
+ EB21 p1B21 p021 VALUE=[K*V(B1,p0)]
+ EC21 p1C21 p021 VALUE=[K*V(C1,p0)]
VA21 p1A21 A2 0
VB21 p1B21 B2 0
VC21 p1C21 C2 0
RA21 A2 0 [R]
RB21 B2 0 [R]
RC21 C2 0 [R]
X1AB A2 B2 RC PARAMS: R=1000 C=1u
X1BC B2 C2 RC PARAMS: R=1000 C=1u
X1CA C2 A2 RC PARAMS: R=1000 C=1u
.ENDS TV_3f_m1
```

Тексты даны без комментариев, жирным шрифтом выделены предложения, соответствующие описанию демпфирующих цепей.

Второй способ применен для устранения сбоя в работе программы на этапе вычисления начальных условий. Для этой цели создан текстовый файл OSOB.txt, который с помощью команд Library and Include Files меню Analysis программы Schematics присоединен к комплекту текстовых описаний компонентов модели (рис. 48).

Как видно из текста файла OSOB.txt, параллельно тиристорам подключаются резисторы 10 кОм, с помощью которых устраняется сбой в работе программы на начальном этапе.

Остановимся на информационных сообщениях программы PSpice при попытке моделирования схемы рис. 47 без файла OSOB.txt. В этом случае программа выдает информацию, показанную на рис. 49, откуда следует, что программа прекратила работу на этапе проверки схемы и установила, что в схеме име-



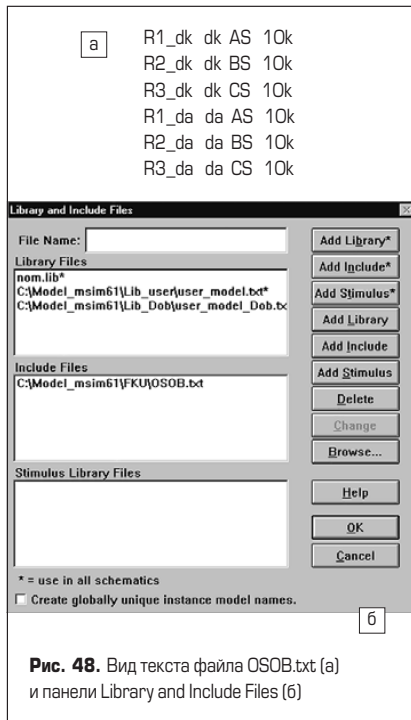


Рис. 48. Вид текста файла OSOB.txt (a) и панели Library and Include Files (б)

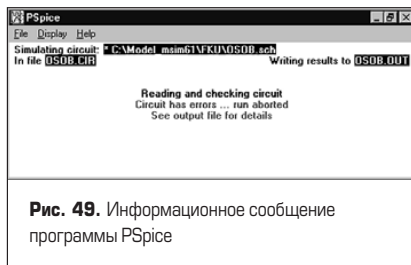


Рис. 49. Информационное сообщение программы PSpice

ются ошибки, зафиксированные в выходном файле с расширением .out.

Просмотр файла с расширением .out. представляет следующие ошибки:

```
ERROR -- Node dk is floating
ERROR -- Node da is floating
ERROR -- Node X_M.G1 is floating
ERROR -- Node X_M.X_VS1.pA is floating
ERROR -- Node X_M.G3 is floating
ERROR -- Node X_M.X_VS3.pA is floating
ERROR -- Node X_M.G5 is floating
ERROR -- Node X_M.X_VS5.pA is floating
```

Анализ данного списка ошибок показывает, что программа не в состоянии рассчитать начальные потенциалы точек (da, dk), отделенных от источников ЭДС тиристорами, и потенциалы некоторых точек в схемах замещения тиристоры.

Таким образом, можно констатировать, что система диагностики программы PSpice не всегда корректно оценивает истинную ошибку, приводящую к сбою в ее работе.

В завершение покажем примеры, иллюстрирующие возможность универсальной модели для исследования качества электроэнергии в цепях с преобразователями.

**Пример 7.** Многовариантное исследование влияния на питающую сеть трехфазного мостового тиристорного преобразователя.

Схема преобразователя на рис. 47 создана в среде программы Schematics и предназначена

для исследования влияния на питающую сеть трехфазного мостового тиристорного преобразователя, работающего в следующих режимах: 1) выпрямление без фильтрокомпенсирующего устройства (ФКУ); 2) инвертирование без ФКУ; 3) выпрямление с ФКУ; 4) инвертирование с ФКУ.

Цель исследования — обеспечить в режимах 3, 4 значение коэффициента искажения синусоидальности фазного напряжения сети, установленное ГОСТ 13109-97.

Условные обозначения на рис. 47:

- Ea, Eb, Ec — источники ЭДС;
- La, Lb, Lc — индуктивности питающей сети;
- FK — ФКУ;
- TV — трансформатор;
- K — коэффициент трансформации;
- La2, Lb2, Lc2 — индуктивности рассеяния трансформатора, приведенные ко вторичной обмотке;
- M — трехфазный мостовой тиристорный преобразователь;
- I — ток нагрузки, имитируемый источником постоянного тока;
- PARAMETRS — графические символы PARAM, предназначенные для вариации параметров схемы: ALPHA — угол управления преобразователя (эл. градус); T\_puls — дли-

тельность импульса (эл. градус); FREQ — частота (Гц); Ls — индуктивности питающей сети (мГн); TENS — действующее значение напряжения источников ЭДС (В); Lk — индуктивности рассеяния трансформатора, приведенные ко вторичной обмотке (мГн); CF, RF, LF — параметры фильтров ФКУ (пФ, Ом, мГн соответственно);

- SA, SB, SC, AS, BS, CS, da, dk — маркировки проводников.

Схема ФКУ на рис. 47 содержит демпфирующий фильтр второго порядка, настроенный на третью гармонику (параметры с индексом «1») и батарею параллельных конденсаторов (параметры с индексом «2») [20].

Параметры схемы на рис. 47 реализуют режим работы 1, ФКУ отключено путем задания в режиме диалога малого значения емкостей фильтров (10 пФ, 6 пФ).

Типичные кривые напряжений, характеризующие данный режим: выпрямленное напряжение (U (dk, da)), напряжение на тиристоре (U (AS, dk)), фазное напряжение сети (U (TV:A1)) — показаны на рис. 50.

Кривые на рис. 50 получены в программе Probe как результат моделирования режима работы 1.

Точки, которым соответствуют эти кривые, обозначены на рис. 47 маркерами.

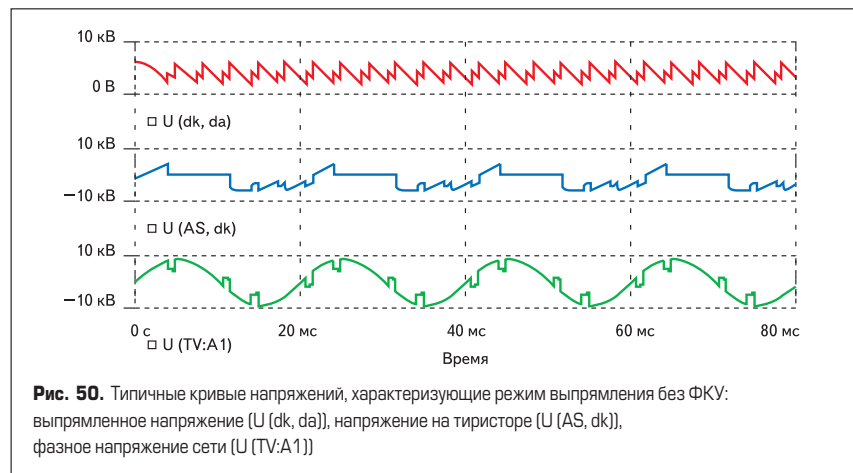


Рис. 50. Типичные кривые напряжений, характеризующие режим выпрямления без ФКУ: выпрямленное напряжение (U (dk, da)), напряжение на тиристоре (U (AS, dk)), фазное напряжение сети (U (TV:A1))

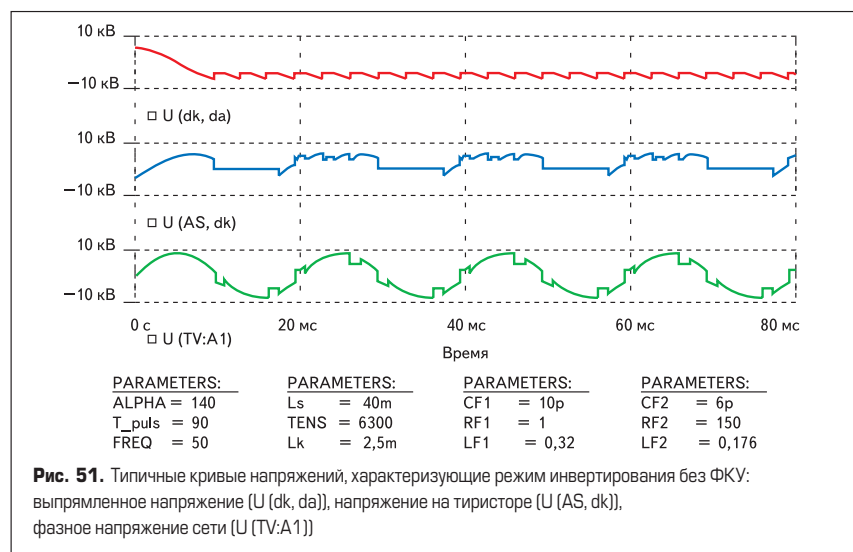
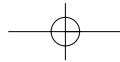


Рис. 51. Типичные кривые напряжений, характеризующие режим инвертирования без ФКУ: выпрямленное напряжение (U (dk, da)), напряжение на тиристоре (U (AS, dk)), фазное напряжение сети (U (TV:A1))



Аналогичные кривые для режима 2 и соответствующие этому режиму параметры, редактируемые с помощью графических символов PARAM, показаны на рис. 51, для режима 3 — на рис. 52, для режима 4 — на рис. 53.

Как видно из сопоставления параметров и кривых, изображенных на рис. 47, 50...53, поставленная задача решена путем редактирования трех из двенадцати параметров, указанных в графических символах PARAM (ALPHA, CF1, CF2).

**Пример 8.** Выбор параметров фильтрокомпенсирующего устройства для тяговой подстанции постоянного тока для железнодорожного транспорта.

На тяговых подстанциях постоянного тока России ФКУ не применяются, поэтому значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения в точке их присоединения к сети, как правило, превышает норму по ГОСТ 13109-97.

Выбор параметров ФКУ состоит из трех этапов [20, 21].

На первом этапе рассчитываются компоненты, необходимые для вычисления реактивной мощности ФКУ:

- $U_{1s}$  — фазное напряжение в точке присоединения преобразователя к сети;
- $I_{1s}$  — фазный ток сети;
- $\alpha$  — угол управления преобразователя;
- $\gamma$  — угол коммутации преобразователя.

Для этого в среде программы Schematics системы Design, в основном на базе графических символов и макромоделей специализированных библиотек, создается компьютерная модель, адекватно отражающая реальную схему присоединения преобразователя к питающей сети, и выполняется ее анализ. Значения  $U_{1s}$  и  $I_{1s}$  определяются по результатам гармонического анализа кривых фазного напряжения и фазного тока сети, которые заносятся в файл с расширением .out. Значения  $\alpha$  и  $\gamma$  определяются в результате обработки в среде графического редактора Probe кривых напряжений, приложенных к вентилям преобразователя.

На втором этапе по формуле (1) вычисляется реактивная мощность ФКУ, выбирается схема ФКУ и рассчитываются параметры фильтров.

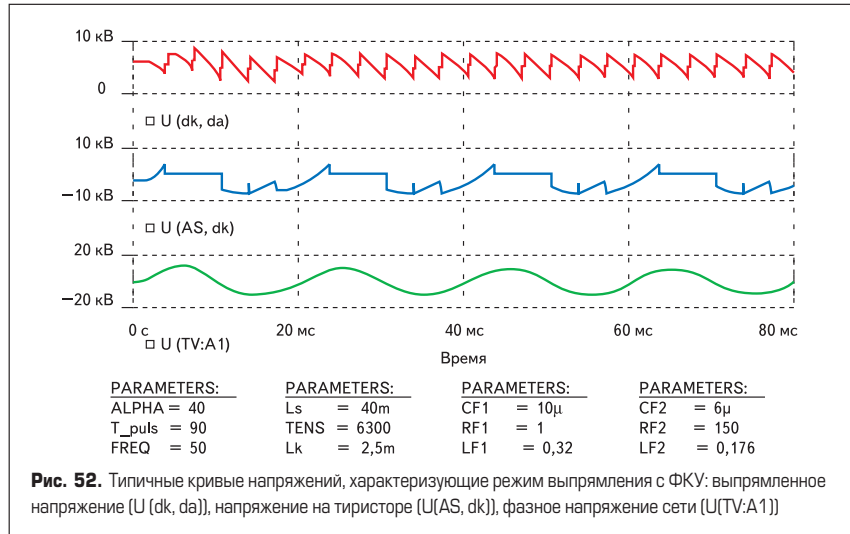
$$Q_{\text{ФК}} = U_{1s} I_{1s} \sin(\alpha + \gamma/2), \quad (1)$$

где  $Q_{\text{ФК}}$  — реактивная мощность фазы ФКУ.

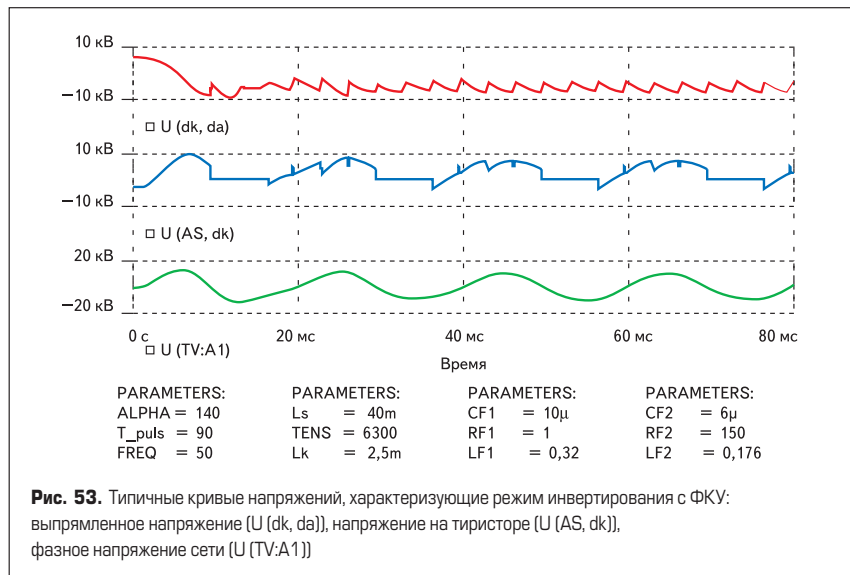
На третьем, заключительном этапе в среде программы Schematics системы Design моделируется схема присоединения преобразователя с ФКУ к питающей сети и рассчитывается значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения в точке их присоединения. При отрицательном результате расчеты повторяются, начиная со второго этапа.

На рис. 54 показана компьютерная модель схемы присоединения преобразователя подстанции к питающей сети, созданная в среде программы Schematics системы Design.

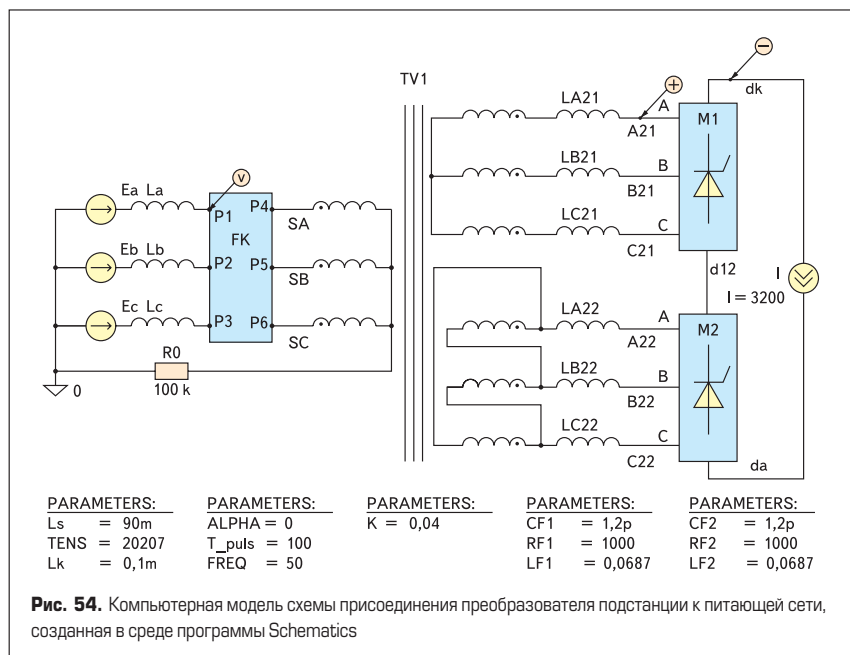
Условные обозначения графических символов на рис. 54:



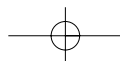
**Рис. 52.** Типичные кривые напряжений, характеризующие режим выпрямления с ФКУ: выпрямленное напряжение [U (dk, da)], напряжение на тиристоре [U(AS, dk)], фазное напряжение сети [U(TV:A1)]

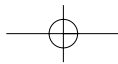


**Рис. 53.** Типичные кривые напряжений, характеризующие режим инвертирования с ФКУ: выпрямленное напряжение [U (dk, da)], напряжение на тиристоре [U (AS, dk)], фазное напряжение сети [U (TV:A1)]



**Рис. 54.** Компьютерная модель схемы присоединения преобразователя подстанции к питающей сети, созданная в среде программы Schematics





- Ea, Eb, Ec — источники ЭДС;
- La, Lb, Lc — индуктивности питающей сети;
- FK — ФКУ;
- TV1 — трансформатор;
- LA21, LB21, LC21, LA22, LB22, LC22 — индуктивности рассеяния трансформатора, приведенные ко вторичным обмоткам;
- M1, M2 — трехфазные мостовые тиристорные преобразователи;
- I — ток нагрузки, имитируемый источником постоянного тока;
- PARAMETRS — графические символы PARAM, предназначенные для вариации параметров схемы: ALPHA — угол управления преобразователя (эл. градус); T\_puls — длительность импульса (эл. градус); FREQ — частота (Гц); Ls — индуктивности питающей сети (мГн); TENS — действующее значение напряжения источников ЭДС (В); Lk — индуктивности рассеяния трансформатора, приведенные ко вторичным обмоткам (мГн); CF, RF, LF — параметры фильтров ФКУ (пФ, Ом, мГн соответственно); K — коэффициент трансформации;
- SA, SB, SC, A21, B21, C21, A22, B22, C22, da, dk, d12 — маркировки проводников.

Модель отображает схему присоединения двенадцатипульсного тиристорного преобразователя с ФКУ на входе к питающей сети. Схема данной модели составлена на базе графических символов универсальной модели для исследования качества электроэнергии в цепях с преобразователями. Параметры модели трансформатора TV1 соответствуют параметрам серийного трансформатора типа ТРДП-16000/35ЖУ1, который применяется на тяговых подстанциях железнодорожного транспорта для питания двенадцатипульсных выпрямителей. Параметр модели преобразователя — угол управления ALPHA — равен нулю, поскольку выпрямители тяговых подстанций выполняются на диодах.

Модель на рис. 54 является универсальной в том смысле, что она используется как для расчетов на первом этапе методики, то есть без ФКУ, так и на третьем этапе, то есть с подключенным ФКУ. Отключение модели ФКУ производится путем задания в диалоговом режиме малого значения емкости фильтра, в данном случае 1,2 пФ, что эквивалентно размыканию цепей фильтров.

Модель схемы ФКУ выполнена в виде иерархического символа — блока FK, функциональная схема блока FK показана на рис. 55. Функциональная схема блока FK представляет собой два графических символа трехфазной схемы ФКУ, соединенных параллельно.

Результаты расчета схемы без ФКУ показаны в таблице 1 и на рис. 56, 57а.

Значения  $U_{1s}$  и  $I_{1s}$  получены по результатам моделирования схемы рис. 54, которые занесены в файл с расширением .out.

Таблица 1

Фазное напряжение в точке присоединения преобразователя к сети, $U_{1s}$ , В	Фазный ток сети, $I_{1s}$ , А	$\gamma$ , эл. град	$\sin\gamma/2$	Реактивная мощность фазы ФКУ, $Q_{фкУ}$ , кВАр
18000	203	30	0,258	940

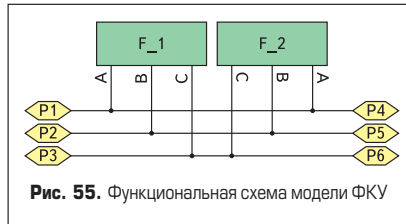


Рис. 55. Функциональная схема модели ФКУ

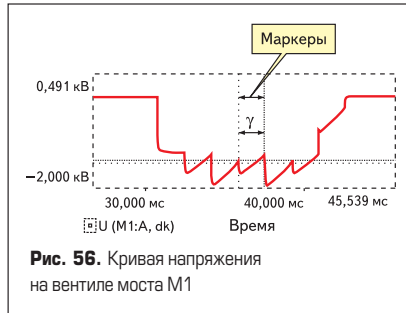


Рис. 56. Кривая напряжения на вентиле моста M1



Рис. 57. Кривые фазного напряжения в точке присоединения преобразователя к сети: а) без ФКУ; б) с ФКУ

Способ вычисления угла коммутации показан на рис. 56, где  $U (M1: A1, dk)$  — напряжение на вентиле между точками A1 и dk моста M1. Значение определяется по кривой напряжения, приложенного к вентилю моста M1 (рис. 54), в результате обработки этой кривой в среде графического редактора Probe с помощью маркеров. Точки, между которыми измеряется напряжение на вентиле моста M1, показаны на рис. 54 маркерами-стрелками со знаками «+» и «-».

Кривая фазного напряжения в точке присоединения преобразователя к сети без ФКУ показана на рис. 57а. Точка, в которой измеряется напряжение, показана на рис. 54 маркером-стрелкой со знаком «v». Значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения составляет 8,43%.

Схема ФКУ выполнена в виде демпфирующего фильтра второго порядка, настроенного на одиннадцатую гармонику. Реактивная

Таблица 2

Реактивная мощность фазы одного звена ФКУ, $Q_{фкУ}$ , кВАр	Емкость фазы одного звена ФКУ, $C_{ф}$ , мкФ	Индуктивность фазы одного звена ФКУ, $L_{ф}$ , Гн	Активное сопротивление фазы одного звена ФКУ, $r$ , Ом
470	1,2	0,0687	1000

мощность ФКУ разделена между двумя звеньями, чтобы иметь возможность отключать одно звено при сбросе нагрузки во избежание перекомпенсации. Параметры фазы одного звена ФКУ, рассчитанные по формулам [20, 21] (7–10), даны в таблице 2.

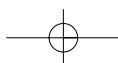
Результаты расчета кривой фазного напряжения в точке присоединения преобразователя к сети с ФКУ показаны на рис. 57б. Точка, в которой измеряется напряжение, показана на рис. 54 маркером-стрелкой со знаком «v». Значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения составляет 0,99%, то есть соответствует норме по ГОСТ 13109-97.

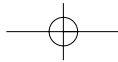
## Заключение

1. Интенсификация применения полупроводниковых преобразователей во всех сферах национальной экономики России вызывает необходимость осуществления технического регулирования в области электромагнитной совместимости средств и систем силовой преобразовательной техники с питающей сетью в соответствии с положениями Федерального закона «О техническом регулировании». Силовые полупроводниковые преобразователи являются наиболее массовым и мощным источником помех, влияющих на качество электроэнергии. Техническое регулирование в указанной области должно быть ориентировано на создание правовой и нормативной базы в целях защиты жизни и здоровья граждан, имущества физических и юридических лиц, государственного и муниципального имущества от последствий нарушения функционирования технических средств, обусловленных низким качеством электроэнергии.

2. Практическое решение проблемы повышения качества электроэнергии в электрических сетях России необходимо начинать с реализации мероприятий, обеспечивающих нормы показателей качества электроэнергии (ПКЭ) по ГОСТ 13109-97 на промышленных объектах, где широко используется мощная преобразовательная техника. К таким объектам в первую очередь относятся алюминиевые комбинаты, заводы черной металлургии, тяговые подстанции железнодорожного транспорта, метрополитена, городского транспорта. Нормы ПКЭ в точках присоединения указанных объектов к питающим сетям надо ввести в технический регламент «Об электромагнитной совместимости» и осуществлять государственный надзор за их соблюдением.

3. Вопросы обеспечения электромагнитной совместимости преобразователей с питающей сетью следует решать на этапе проектирования указанных объектов и предусматривать в проекте средства, обеспечивающие соответствие качества электроэнергии стандартным требованиям. Технология макро моделирования, основы которой представлены в настоящей работе, позволяет эффективно использовать для этих целей систему схемотехнического моделирования электронных схем Design — PSpice.





## Литература

1. Кудрявый В. В. Перспективы развития электроэнергетики России // Электро. 2003. № 1.
2. Каргашов 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 — 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.

