

Окончание. Начало в № 1, 2'2004, 2, 4'2005, 1'2006.

# Опыт моделирования систем силовой электроники

## в среде ORCAD 9.2. Часть VI

Юрий Болотовский,  
к. т. н.

eltech@ufacom.ru

Георгий Таназлы,  
к. т. н.

g\_thanazly@mail.ru

### Моделирование трехфазной мостовой тиристорной схемы в режимах выпрямителя и инвертора

Задача — построить модель трехфазной мостовой тиристорной схемы, нагруженной через сглаживающий дроссель на активное сопротивление, которая позволяет:

- получить регулировочную кривую выходного напряжения в зависимости от угла управления;
- моделировать аварийный режим короткого замыкания нагрузки;
- моделировать переход работы схемы при аварии из выпрямительного в инверторный режим для исследования динамики рассеяния энергии, запасенной в сглаживающем дросселе.

Модель, ее особенности и параметры:

- Входная сеть —  $3 \times 380$  В.
- Моделирование сети — фазные индуктивности 10 мкГн.
- Индуктивность сглаживающего дросселя — 2 мГн.
- Сопротивление нагрузки — 0,76 Ом (рассеиваемая мощность — 320 кВт).
- Тиристоры, применяемые в выпрямителе, — ТБ143-630-14 [1].
- Детализация системы управления — минимальная. На рис. 1 приведена принципиальная схема рассматриваемой модели.

Опишем некоторые особенности схемы. Силовая питающая сеть моделируется источниками синусоидального напряжения типа VSIN — V1, V2, V3. Источник V1 имеет фазу PHASE = 0, источник V2 — PHASE = -120, источник V3 — PHASE = 120. Собственные индуктивности питающей сети представлены индуктивностями L1, L2, L3.

Как известно, для рассматриваемой схемы возможно два варианта управления тиристорами: первый вариант — управление длинными импульсами, а второй, принятый в модели, — управление короткими (600 мкс) импульсами управления. Система управления моделируется источниками питания типа VPULSE от V4 до V27.

Для управления силовыми тиристорами VT1–VT6 в выпрямительном режиме работы схемы используются источники V4, V5, V6, V7, V12, V13, V14, V15, V20, V21, V22 и V23, которые подключаются к соответствующим тиристорам через нормально замкнутые ключи Sw\_tOpen (библиотека anl\_misc.lib) U1, U2, U5, U6, U9 и U10.

Для управления силовыми тиристорами VT1–VT6 в инверторном режиме работы схемы используются

источники V8, V9, V10, V11, V16, V17, V18, V19, V24, V25, V26 и V27, которые подключаются к соответствующим тиристорам через нормально разомкнутые ключи Sw\_tClose (библиотека anl\_misc.lib) U3, U4, U7, U8, U11 и U12.

Авария (замыкание нагрузки) имитируется ключом типа Sw\_tClose (библиотека anl\_misc.lib) U13. Ключи Sw\_tClose и Sw\_tOpen (библиотека anl\_misc.lib) характеризуются следующими параметрами: время переключения TTRAN — 1 мкс, сопротивление ключа в замкнутом состоянии RCLOSED — 0,01 Ом, сопротивление ключа в разомкнутом состоянии ROPEN — 1 МОм.

Численные значения параметров элементов приведены на схеме (рис. 1).

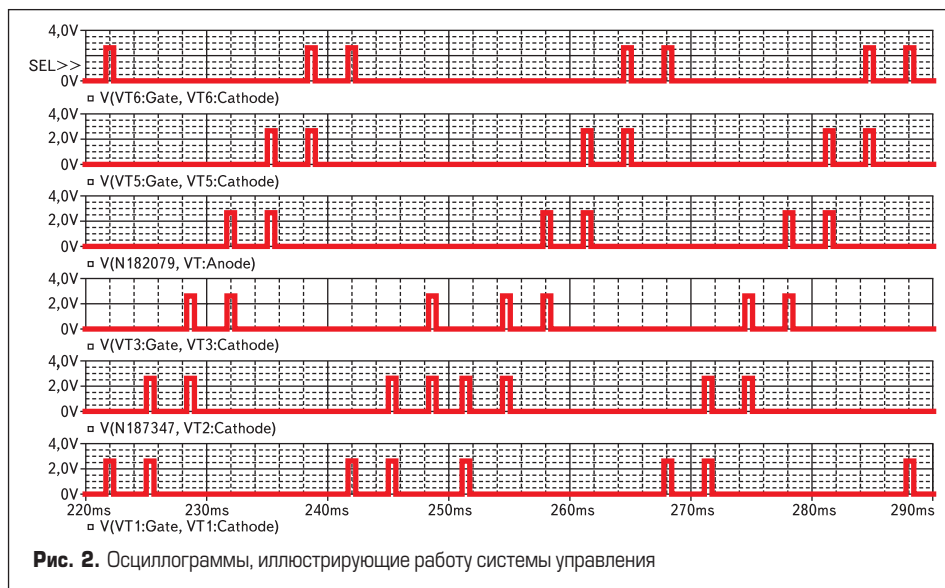
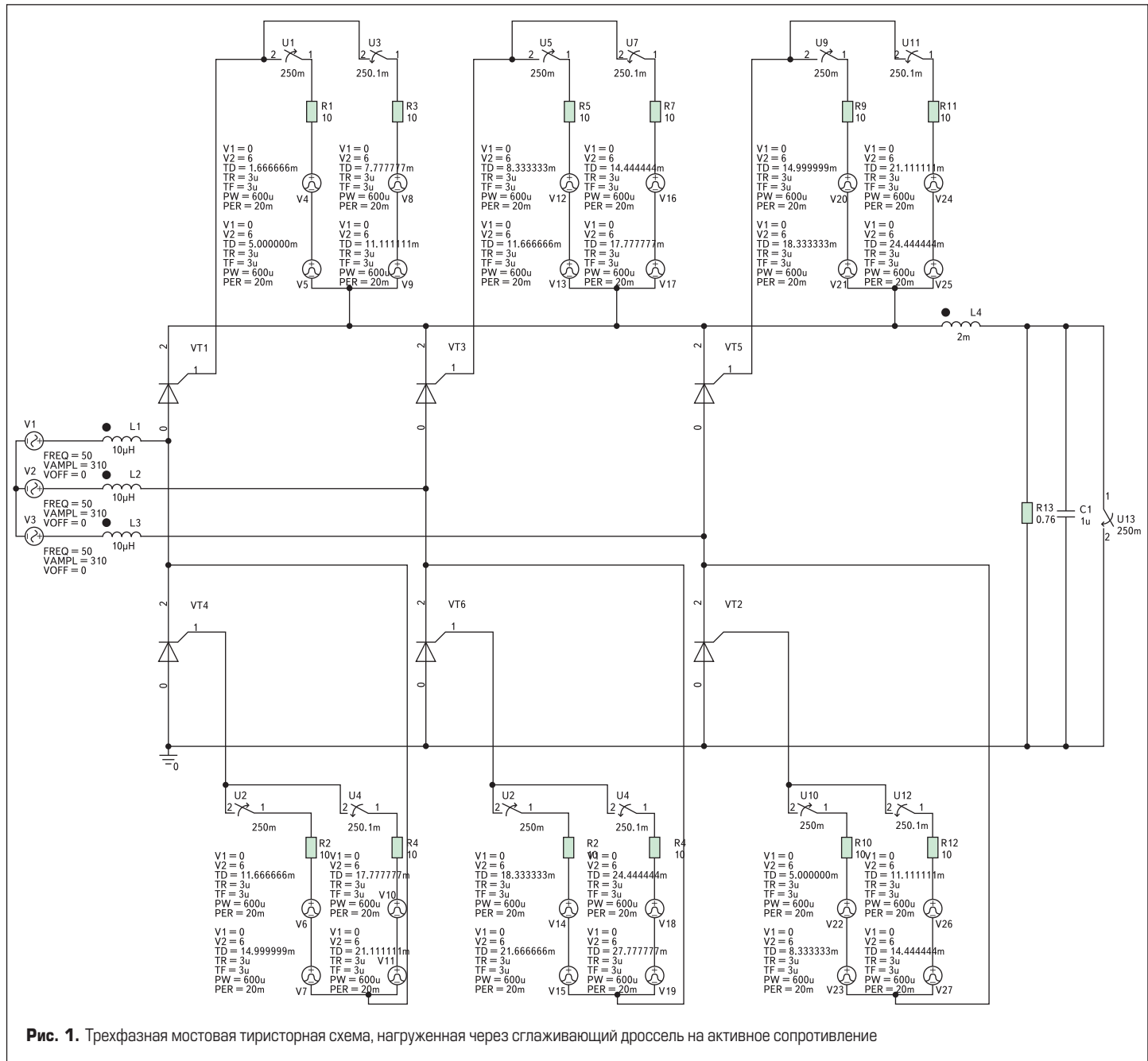
Схема моделировалась при следующих значениях управляющих опций:

- RELTOL = 0,0052688
- VNTOL = 1,0m
- ABSTOL = 1,0m
- CHGTOL = 0,01m
- GMIN = 1e-12
- ITL4 = 27
- STEPGMIN = «Вкл.»
- SKIPBP = «Вкл.»
- $h_{\max}$  (Maximum Step Size) = 1e-5
- TSTOP = 400m

Принято, что авария происходит в момент времени, равный 250 мс. Поведение системы управления при этом моделируется следующим образом: импульсы управления, определяющие работу схемы в режиме выпрямления, снимаются с силовых тиристоров в 250 мкс, в это же время происходит закорачивание нагрузочного сопротивления R1. Схема переводится в режим инвертирования в момент времени 250,1 мс.

Работа системы управления иллюстрируется осциллограммами (рис. 2). Выпрямительный режим реализован при угле управления, равном 0, а инверторный режим — при угле управления 110 электрических градусов.

На рис. 3 приведены осциллограммы (снизу вверх) напряжения на выходе выпрямителя (до дросселя L4), напряжения на нагрузочном сопротивлении R13, тока через дроссель L4 и суммарной мощности источников V1, V2, V3, имитирующих сеть. Характерно, что до аварии и перевода схемы в инверторный режим суммарная мощность отбиралась от источников (на верхней осциллограмме — отрицательная), а после аварии, в момент времени около 255 мс,



происходит смена знака суммарной мощности, то есть она начинает потребляться источниками V1, V2, V3.

На рис. 4 приведены осциллограммы напряжения на тиристоре VT1, тока через тиристор VT1 и тока через индуктивность L1.

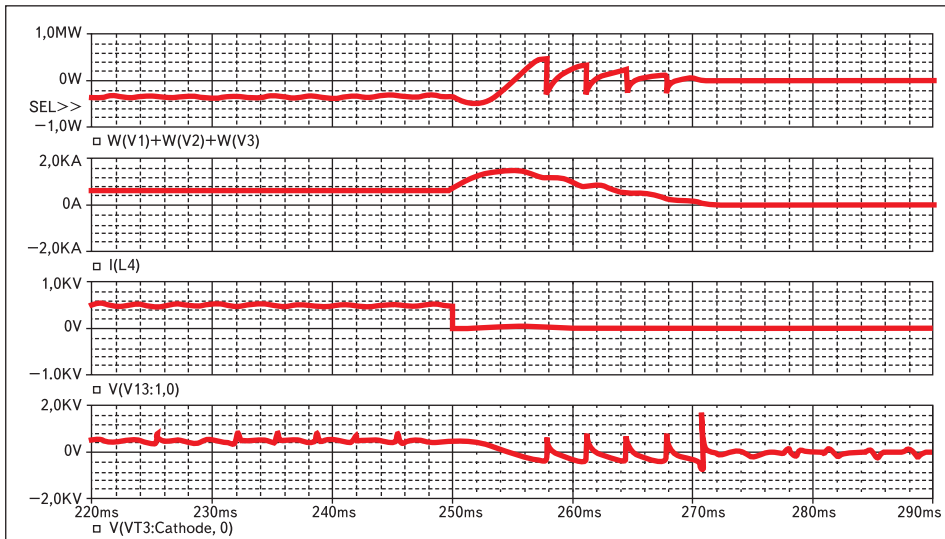
На рис. 5 приведена регулировочная характеристика выходного напряжения, полученная на рассматриваемой модели в выпрямительном режиме.

Таким образом, построенная модель позволила решить все поставленные задачи.

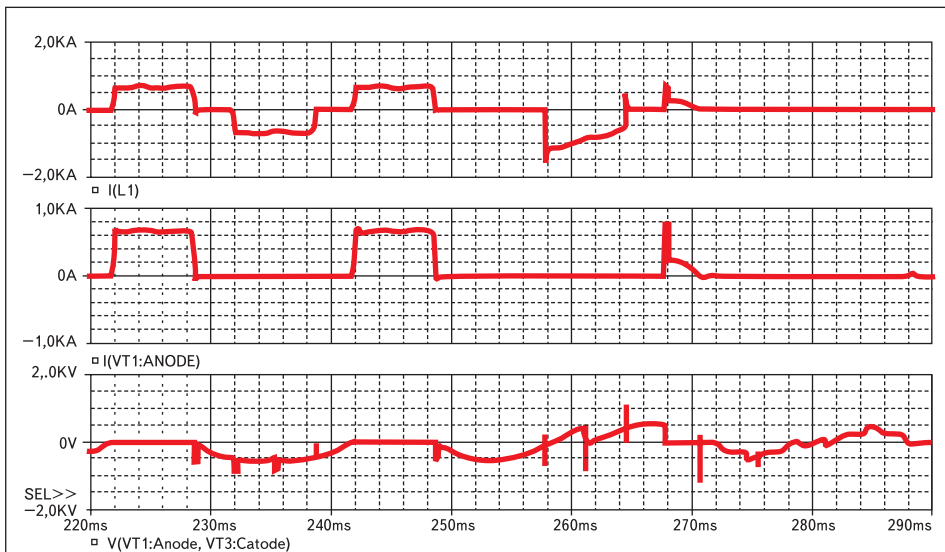
### Моделирование схемы формирователя управляющих импульсов

Задача — построить модель формирователя управляющих импульсов, обеспечивающую получение двух последовательностей потенциально развязанных управляющих импульсов, смещенных на 180 электрических градусов. Источник питания формирователя — один. Модель должна позволять:

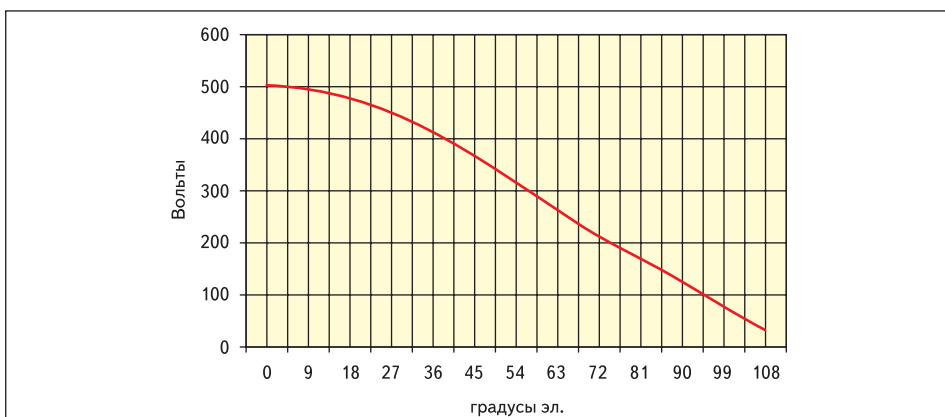
- измерять крутизну фронтов полученных импульсов управления при работе на IGBT-транзисторы;
- контролировать индукцию в сердечнике трансформатора;



**Рис. 3.** Осциллограммы напряжений на выходе выпрямителя и на нагрузочном сопротивлении тока через сглаживающий дроссель, а также суммарной мощности источников, имитирующих сеть



**Рис. 4.** Осциллограммы напряжения на тиристоре VT1 и токов через тиристор VT1 и индуктивность L1



**Рис. 5.** Регулировочная характеристика управляемого выпрямителя. Нагрузка — RLR = 0,76 Ом, L = 2 мГн, P = 320 кВт.

- контролировать задержку силовых импульсов, снимаемых с нагрузочных сопротивлений IGBT-транзисторов по сравнению с импульсами управления. Модель, ее особенности и параметры:
- Напряжение питания формирователя — 15 В.
- Применяемые в формирователе транзисторы — KT3102, KT3107.
- Трансформатор выполнен на кольцевом сердечнике из феррита NM2000 [1].
- Модель сердечника строилась по следующим параметрам: AREA = 0,24, PATH = 5,0265, PACK = 1, GAP = 0.
- Индуктивности рассеяния L5 и L6, приведенные к обмоткам L1 и L2, равны по 3 мкГн.

- Силовые IGBT-транзисторы — IRG4PH50U.
- В модели применены диоды КД521А.
- В качестве задающих генераторов используются источники напряжения типа VPULSE.
- Силовые IGBT-транзисторы нагружены на активные сопротивления. Напряжения силовых источников питания — 100 В.

На рис. 6 приведена принципиальная схема рассматриваемой модели.

Численные значения параметров элементов приведены на схеме модели (рис. 6).

Схема моделировалась при следующих значениях управляющих опций:

- RELTOL = 0,001
- VNTOL = 1,0u
- ABSTOL = 1,0p
- CHGTOL = 0,01p
- GMIN = 1e-12
- ITL4 = 10
- STEPGMIN = «Вкл.»
- SKIPBP = «Вкл.»
- h<sub>max</sub> (Maximum Step Size) = 2e-4
- TSTOP = 10m

Заданный набор управляющих опций позволяет проводить моделирование с достаточно большим быстродействием и необходимой точностью.

На рис. 7 приведены осциллограммы (снизу вверх) индукции в сердечнике, тока через сопротивление R5, напряжения источника V2, тока через сопротивление R3 и напряжения источника V3.

Как видно из рис. 7, кривая индукции имеет симметричный характер, и максимальное значение индукции составляет 884 Гс, что существенно меньше индукции насыщения для данного сердечника — 3794,8 Гс.

На рис. 8 приведены совмещенные на одной осциллограмме импульс задающего генератора и импульс тока, снимаемый с нагрузочного сопротивления.

Обработка осциллограмм, приведенных на рис. 8, позволила установить, что силовой токовый импульс обладает следующими параметрами:

- длительность переднего фронта (измерено на интервале между уровнем 10% и уровнем 90%) — 250 нс;
- длительность заднего фронта (измерено на интервале между уровнем 10% и уровнем 90%) — 384 нс;
- задержка переднего фронта (уровень 10%) — 840 нс;
- задержка переднего фронта (уровень 90%) — 800 нс;
- задержка заднего фронта (уровень 10%) — 1070 нс;
- задержка заднего фронта (уровень 90%) — 900 нс.

На рис. 9 приведены совмещенные на одной осциллограмме импульс задающего генератора и импульс, подаваемый на затвор IGBT-транзистора. Необходимые сопоставления легко могут быть сделаны по осциллограммам.

В данном примере моделирование позволило выявить достаточно высокие функциональные характеристики рассмотренного формирователя импульсов.

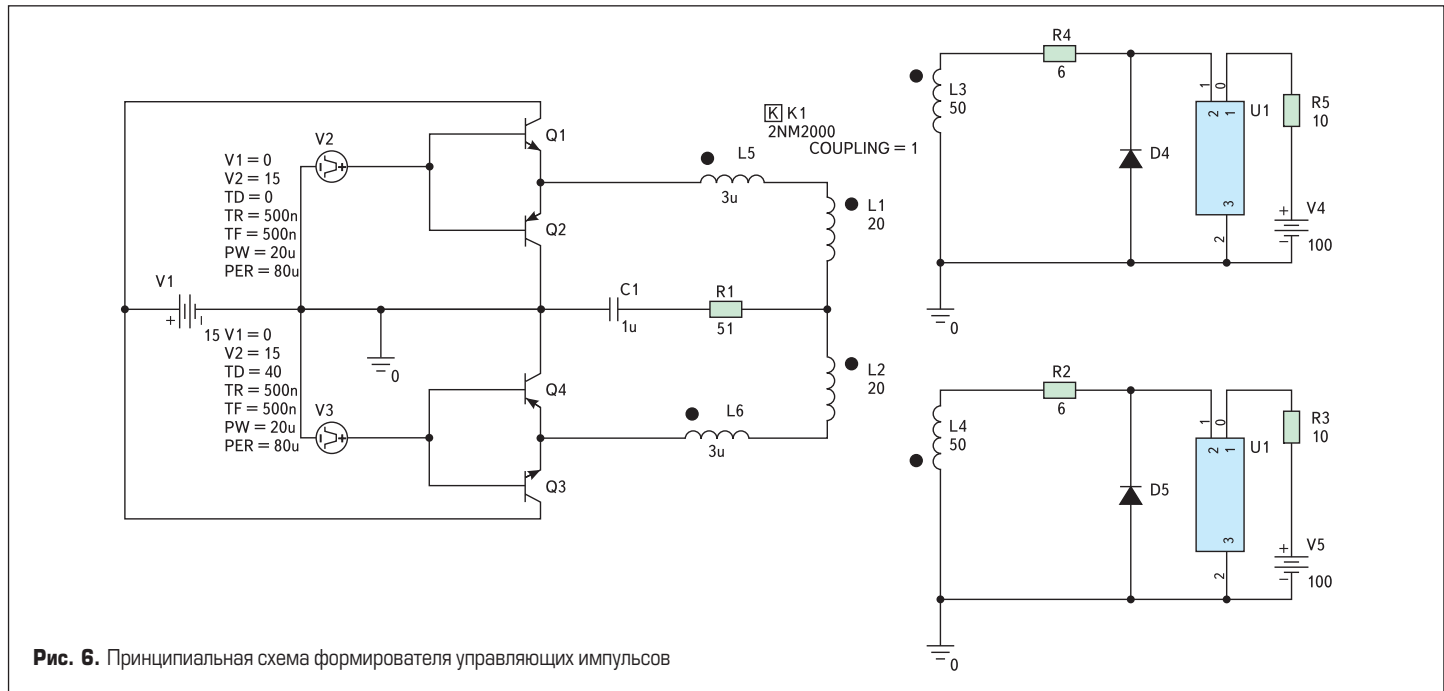


Рис. 6. Принципиальная схема формирователя управляющих импульсов

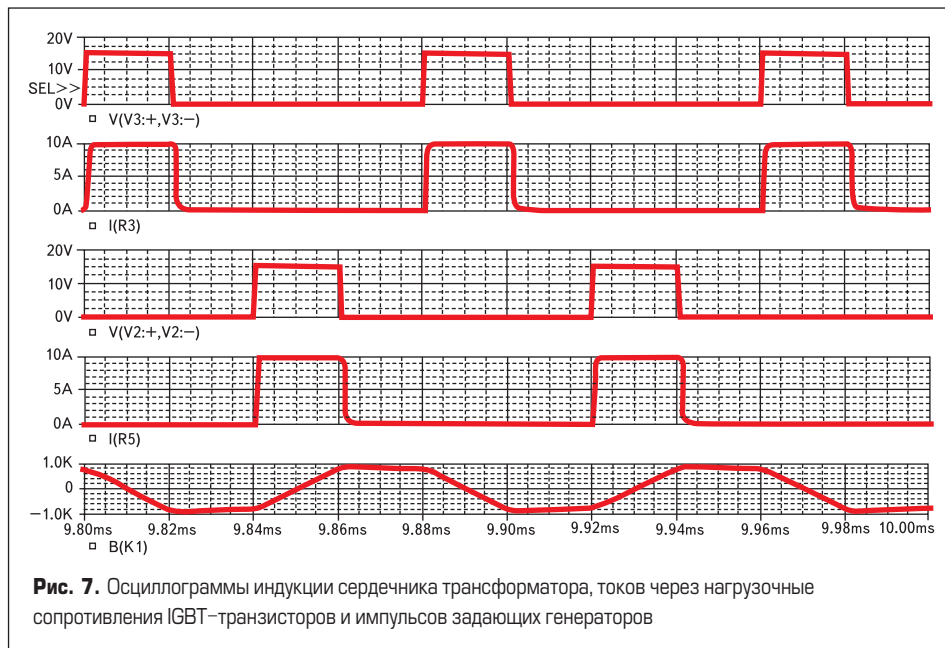


Рис. 7. Осциллограммы индукции сердечника трансформатора, токов через нагрузочные сопротивления IGBT-транзисторов и импульсов задающих генераторов

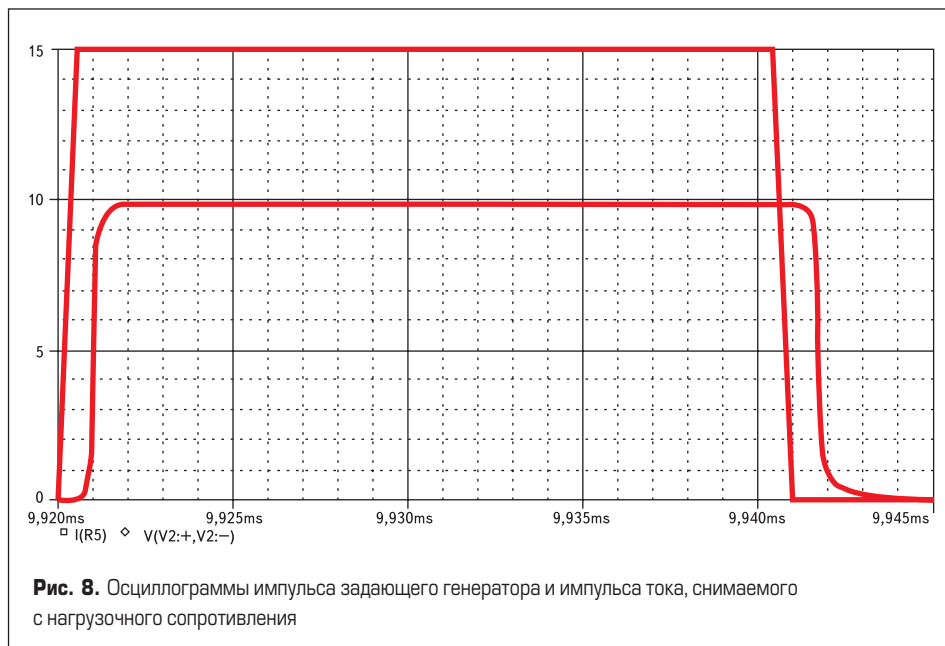


Рис. 8. Осциллограммы импульса задающего генератора и импульса тока, снимаемого с нагрузочного сопротивления

### Моделирование схемы высоковольтной накачки емкостного накопителя энергии на базе инвертора с индуктивно-емкостным преобразователем

Индуктивно-емкостные преобразователи (ИЕП) представляют собой специфический класс систем с резонансными и квазирезонансными свойствами, позволяющими преобразовать систему неизменного напряжения в систему неизменного тока. При постоянстве амплитуды тока и росте сопротивления нагрузки выходное напряжение в системе возрастает, существенно превышая напряжение питания. Целесообразно использование ИЕП для создания систем зарядов высоковольтных накопителей энергии.

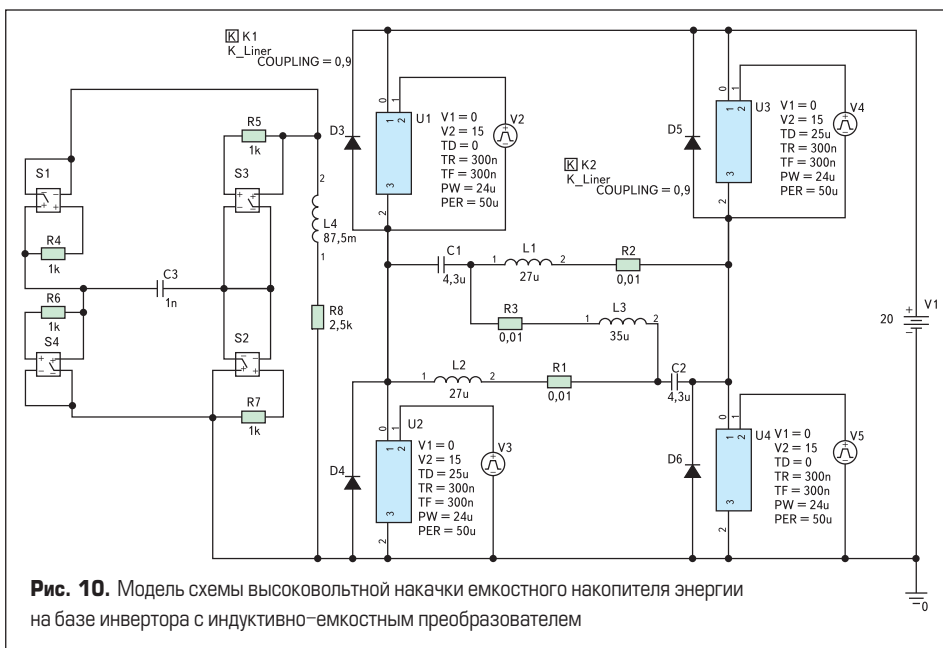
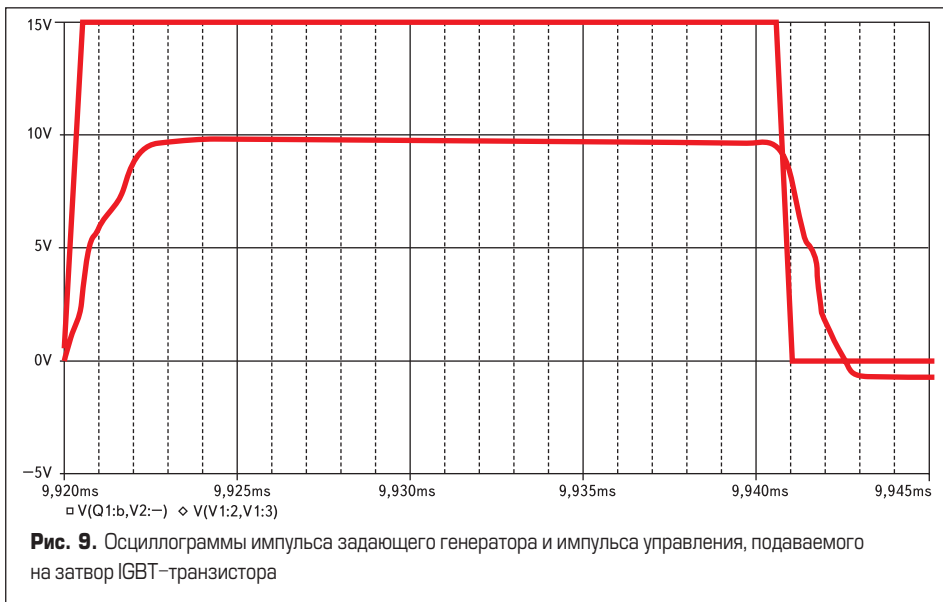
Задача — разработка модели схемы для высоковольтной накачки емкостного накопителя энергии на базе инвертора с индуктивно-емкостным преобразователем, позволяющей:

- получить коэффициент раскочки по напряжению;
- определить максимальные напряжения на транзисторах схемы;
- определить время заряда емкостного накопителя энергии.

Схема высоковольтной накачки емкостного накопителя энергии на базе инвертора с индуктивно-емкостным преобразователем приведена на рис. 10.

Модель, ее особенности и параметры:

- Напряжение питания — 20 В.
- Ключевые элементы мостового преобразователя — IGBT-транзисторы типа IRG4PH50U и диоды типа HFA08TB60 фирмы International Rectifier (модели имеются на сайте производителя [www.irf.com](http://www.irf.com)).
- Выходной повышающий трансформатор — воздушный, с коэффициентом связи Coupling = 0,9.
- Выходной высоковольтный мостовой выпрямитель выполнен на моделях псевдоидеальных диодов [1]. Параметры ключей SBreak RON = 1 Ом, ROFF = 1 Мом.



В качестве емкостного накопителя энергии применяется конденсатор C3 емкостью 1 нФ. Потери в обмотках трансформатора учитываются за счет соответствующих активных сопротивлений.

В ИЕП применяются индуктивно связанные катушки L1 и L2, конденсаторы C1 и C2.

Модель системы управления реализована на источниках типа VPULSE (библиотека source.lib).

Численные значения параметров элементов приведены на схеме (рис. 10).

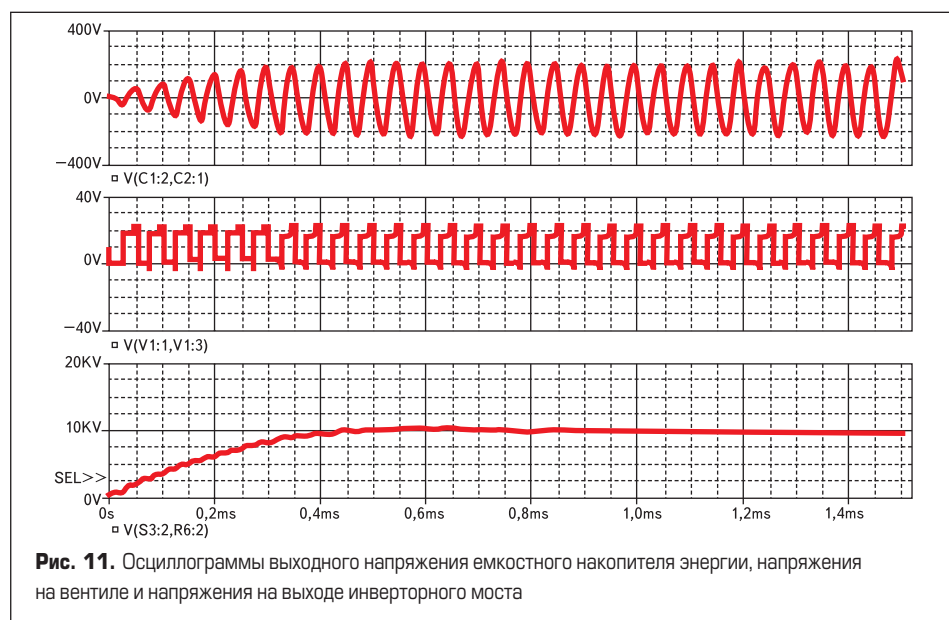
Схема моделировалась при следующих значениях управляющих опций:

- RELTOL = 0,0016777
- VNTOL = 1,0u
- ABSTOL = 1,0p
- CHGTOL = 0,01p
- GMIN = 1e-12
- ITL4 = 26
- STEPGMIN = «Вкл.»
- SKIPBP = «Вкл.»
- h<sub>max</sub> (Maximum Step Size) = 1e-7
- TSTOP = 2,5 m

На рис. 11 приведены осциллограммы (снизу вверх) выходного напряжения емкостного

накопителя энергии, напряжения на вентиле и напряжения на выходе инверторного моста.

В рассматриваемом режиме на емкостном накопителе энергии получено выходное на-



пряжения 9561 В. При входном напряжении 20 В коэффициент раскочки будет равен 487,05. При этом максимальное напряжение на вентиле — 23,695 В. Время заряда емкости до напряжения 9561 В — 1,01 мс.

Характерными особенностями данной схемы являются раскочка напряжения, которую обеспечивает ИЕП (в рассматриваемом случае — амплитуда переменного напряжения на первичной обмотке трансформатора — 238 В) и стабилизация напряжения на вентиле на уровне, близком к напряжению питания.

### Моделирование схемы параллельного инвертора

Постановка задачи. Пусть требуется провести моделирование электромагнитных процессов в параллельном тиристорном инверторе, нагруженном на колебательный контур, для определения параметров элементов схемы и получения различных схемных характеристик (рис. 12). Такое моделирование может потребовать больших затрат компьютерного времени. Для сокращения этих затрат необходимо построить простейшую модель параллельного инвертора. Как известно, процессы пуска параллельного инвертора являются достаточно сложными и требуют установки дополнительного силового оборудования, позволяющего осуществлять безаварийный пуск.

Один из способов обеспечения безаварийного пуска сводится к «разгону» тока во входном дросселе L1 и предварительному заряду емкости C4. «Разгон» тока дросселя осуществляется первоначальным включением тиристора VT1 и VT2 с последующим выключением тиристора VT2 специальным конденсаторно-тиристорным выключателем (на схеме не указан). Предварительный заряд емкости C4 тоже осуществляется специальным конденсаторно-тиристорным зарядным устройством (на схеме не показано).

При построении настоящей модели основной задачей было получение достаточно простой схемы, обеспечивающей приемлемое быстродействие при моделировании. Исследование электромагнитных процессов пуска,

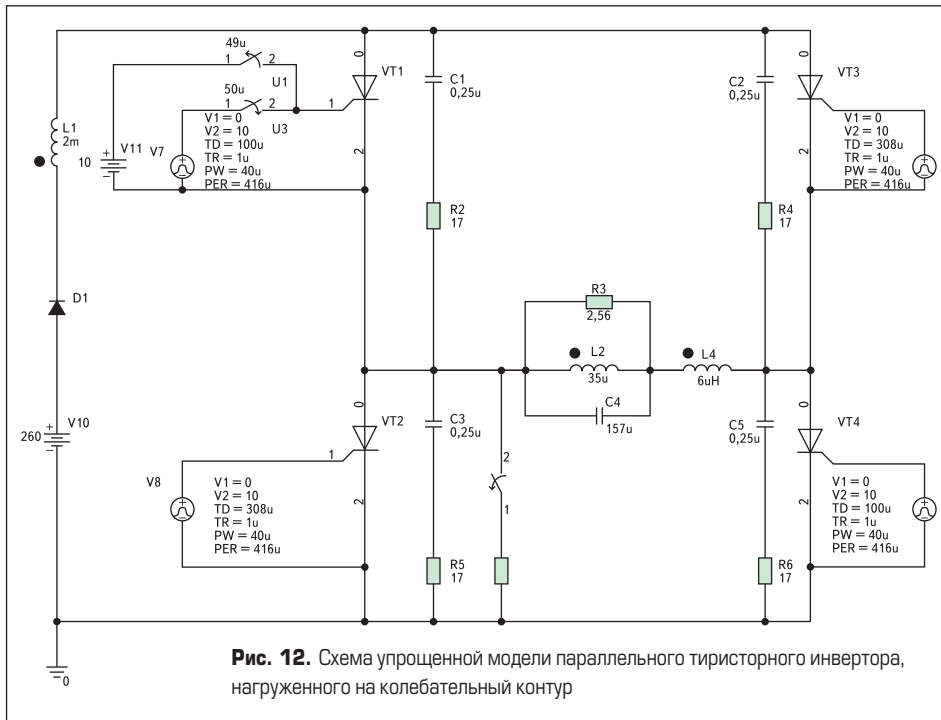


Рис. 12. Схема упрощенной модели параллельного тиристорного инвертора, нагруженного на колебательный контур

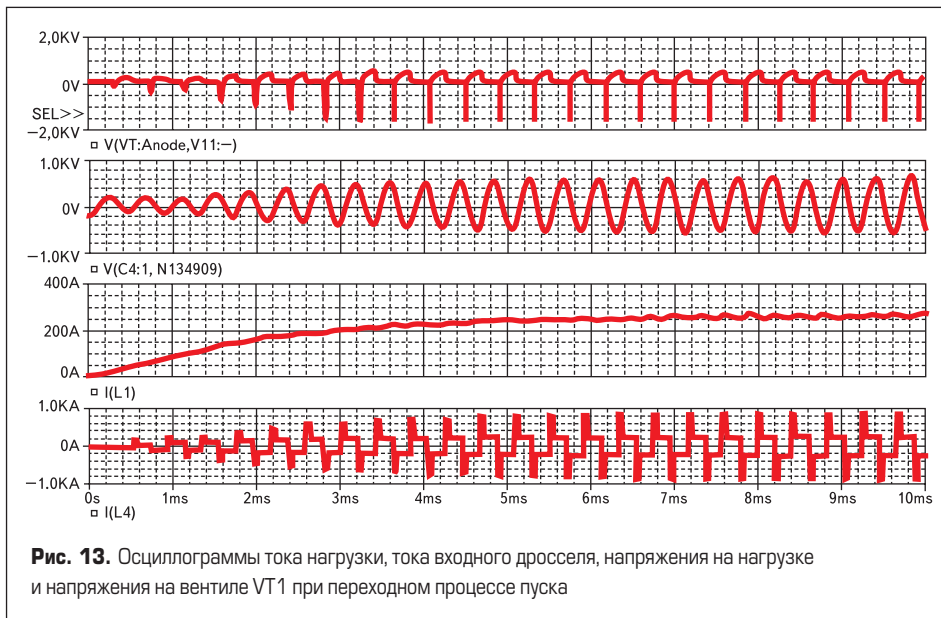


Рис. 13. Осциллограммы тока нагрузки, тока входного дросселя, напряжения на нагрузке и напряжения на вентиле VT1 при переходном процессе пуска

происходящих в реальной системе, в настоящем случае не ставилось. Таким образом, модель пусковой системы в данном случае должна при достаточной простоте обеспечивать пуск параллельного инвертора.

Модель, ее особенности и параметры:

- Источник постоянного напряжения (в реальном случае — управляемый трехфазный тиристорный выпрямитель) моделируется источником постоянного напряжения VDC (библиотека source.lib). Односторонняя проводимость реального выпрямителя реализуется за счет применения модели диода D1 типа DCH143-800-20 [2].
- Модель инвертора состоит из моста, собранного на тиристорах VT1...VT4 типа ТБ143-630-14 [1]. Время выключения тиристора  $t_{off}$  — 16 мкс.
- Нагрузка моделируется параллельным колебательным контуром R3, L2, C4, последовательно с которым в диагональ инверторного моста включен дроссель L4, моделирующий индуктивность силовых шин.

- Параллельно силовым тиристорам установлены демпфирующие RC-цепочки R2C1, R5C3, R4C2, R6C5. Система управления инвертором моделируется четырьмя источниками типа VPULSE (библиотека source.lib). Для обеспечения «разгона» тока во входном дросселе L1 в модель добавляется источник постоянного напряжения V11 и ключ U1 типа SW\_tOpen (библиотека anl\_misc.lib), обеспечивающие включение тиристора VT1 в нулевой момент времени, а также последовательная цепочка из резистора R7 и ключа U2 типа SW\_tOpen (библиотека anl\_misc.lib), включенная параллельно тиристорам VT2. Источник управления V7 подключается к управляющему электроду тиристора VT1 через ключ U3 типа SW\_tClose (библиотека anl\_misc.lib).

Численные значения параметров элементов приведены на схеме (рис. 12).

Схема моделировалась при следующих значениях управляющих опций:

- RELTOL = 0,0010485
- VNTOL = 1,0m

- ABSTOL = 1,0m
- CHGTOL = 0,01m
- GMIN = 1e-8
- ITL4 = 20
- STEPGMIN = «Вкл.»
- SKIPBP = «Вкл.»
- $h_{max}$  (Maximum Step Size) = 1e-7
- TSTOP = 100m

Система запуска работает следующим образом. В нулевой момент времени замкнутый ключ U1 обеспечивает подачу управляющего напряжения от источника V7 на тиристор VT1, что приводит к его отпиранию; разомкнутый в этот момент времени ключ U3 обеспечивает блокировку закорачивания управляющего электрода тиристора VT1 за счет нулевого внутреннего сопротивления источника V7. При этом ток через дроссель L1 протекает по контуру V10-D1-L1-VT1-U2-R7. Величина этого тока к моменту запуска схемы определяется величиной сопротивления R7 и длительностью «разгона». После того как эта величина достигнута, подаются управляющие импульсы от основной системы управления на тиристоры VT1 и VT2, и через некоторый промежуток времени путем размыкания ключа U7 процесс «разгона» тока в дросселе L1 завершается. К этому моменту в рассматриваемом примере ток дросселя L1 составляет 7,6 А. Предварительный заряд емкости C4 осуществляется за счет задания напряжения на ней в виде начального условия («минус» подается на левую обкладку конденсатора C4) в нулевой момент времени. В рассматриваемом примере  $U(C4)$  равно -200 В.

Для обеспечения нормального «разгона» тока импульсы от основной системы управления подаются на тиристоры со сдвигом в 100 (308) мкс соответственно.

Настройка системы «разгона» тока осуществляется подбором трех параметров: временем «разгона» (задается временем срабатывания ключа U2), величиной сопротивления R7 и напряжением на емкости C4.

На осциллограммах (рис. 13) приведены (снизу вверх) ток нагрузки, ток входного дросселя, напряжение на нагрузке и напряжение на вентиле VT1.

Из осциллограмм на рис. 13 видно, что упрощенная система пуска параллельного инвертора успешно реализует свои функции.

Таким образом, продемонстрирована возможность пакета OrCAD и целого ряда приемов, примененных при моделировании, создавать приемлемую по быстродействию и адекватности полученных результатов модель достаточно сложного силового устройства.

### Литература

1. Болотовский Ю. И., Таназлы Г. И. OrCAD. Моделирование. «Поваренная» книга». М.: «СОЛОН-Пресс». 2005.
2. Таназлы Г. И. Повышение эффективности моделирования схем силовой электроники на основе использования адаптивных алгоритмов численного интегрирования. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Уфа: УГАТУ. 2005.