

# Школа MATLAB. Урок 7.

## Модельное исследование основных характеристик силовых полупроводниковых преобразователей. Моделирование устройств силовой электроники

**Предлагаемая статья продолжает цикл публикаций, начатый в предыдущих выпусках приложения. Перед изучением данного материала рекомендуется ознакомиться с основными разделами уроков 1–6 [2–7].**

**Цель этого урока — изучение возможностей среды MATLAB Simulink в расчете и представлении основных характеристик устройств силовой электроники.**

**Для моделирования используются блоки библиотек Simulink и SimPowerSystems. Расчет и представление результатов моделирования реализуются программными и инструментальными средствами Matlab.**

**Сергей Герман–Галкин,  
Д. Т. Н.**

germangalkin@gmail.com

Полупроводниковый преобразователь преобразует электрическую энергию с параметрами  $u_1, f_1$  в электрическую энергию с параметрами  $u_2, f_2$  при воздействии сигналов управления. Кроме силовых полупроводниковых элементов в состав полупроводникового преобразователя, как правило, входят и другие элементы, к ним, в первую очередь, относятся:

- реактивные элементы-конденсаторы, катушки индуктивности, дроссели;
- электромагнитные преобразующие элементы — силовые трансформаторы, измерительные трансформаторы;
- система управления, которая в общем случае представляет собой сложное электронное устройство, реализованное либо на элементах интегральной микросхемотехники, либо на микроконтроллере;
- система защиты и сигнализации аварийных режимов.

Свойства систем силовой электроники изучаются на основе их основных характеристик, которые можно разделить на статические, квазиустановившиеся и динамические.

К квазиустановившимся характеристикам следует отнести:

- мгновенные электромагнитные процессы в нагрузке, в источнике питания и силовых полупроводниковых элементах в установившемся режиме работы полупроводникового преобразователя;
- спектральные характеристики — спектры напряжения и тока в цепи питания и в нагрузке преобразователя.

Статические характеристики устанавливают связь между средними, действующими (эффективными) или амплитудными значениями переменных состояния, к ним относятся:

- регулировочные характеристики, представляющие собой зависимости выходного напряжения или тока от сигнала управления;

- нагрузочные (внешние) характеристики, являющиеся зависимостями выходного напряжения от тока нагрузки;
- электромагнитные характеристики, представляющие собой зависимости амплитудных, действующих (средних) токов (напряжений) в цепи питания и полупроводниковых элементах преобразователя от тока нагрузки;
- энергетические характеристики — зависимости мощности в цепи питания преобразователя, а также мощности потерь в полупроводниковых элементах преобразователя от мощности в нагрузке. К динамическим характеристикам относятся:
- переходные электромагнитные процессы в нагрузке и источнике питания при скачкообразном изменении величины входного сигнала;
- переходные электромагнитные процессы в нагрузке при скачкообразном изменении параметров источника питания;
- переходные электромагнитные процессы в источнике питания при скачкообразном изменении параметров нагрузки;
- переходные электромагнитные процессы в полупроводниковых элементах преобразователя при их переключении.

Независимой переменной при моделировании является время. Поэтому квазиустановившиеся и переходные характеристики являются результатом моделирования и могут быть легко получены в результате моделирования.

Независимыми переменными при построении статических характеристик являются действующие или средние значения переменных состояния в установившемся режиме. Поэтому получение статических характеристик требует специального модельного эксперимента, при котором необходимо изменять независимую переменную и определять необходимые зависимости в установившемся режиме.

Ниже рассмотрены способы получения всех перечисленных характеристик и зависимостей на примере трехфазного автономного инвертора напряжения (АИН) с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) на несущей частоте. По сравнению с однофазным инвертором, рассмотренным в уроках 5, 6, в трехфазном АИН моделирующие напряжения управления транзисторами каждого плеча инвертора сдвинуты на 120 градусов (рис. 1). Эти сигналы сравниваются с пилообразным несущим напряжением и формируют сигналы управления каждым плечом (на рис. 1 показаны

сигналы управления плечом фазы А). В соответствии с сигналами управления транзисторами формируется напряжение на каждой фазе нагрузки.

В настоящее время автономные инверторы все чаще используются в электромеханических системах для управления двигателями переменного тока, системах электропитания в качестве активных выпрямителей, активных фильтров, компенсаторов реактивной мощности и т. д. Во всех этих устройствах инвертор с одной стороны присоединен к источнику переменного напряжения,

а с другой — к источнику постоянного напряжения.

Коэффициентом модуляции в инверторе называется отношение амплитуды модулирующего напряжения к амплитуде пилообразного напряжения.

$$M = U_{m\text{мод}}/U_{m\text{нес}} \quad (1)$$

В диапазоне изменения коэффициента модуляции  $0 < m < 1$  инвертор находится в линейной зоне.

**Описание базовой модели**

Для получения основных характеристик инвертора используются различные модели, отличающиеся в основном блоками измерения и записи результатов измерения в рабочее пространство MATLAB. При этом сам инвертор, его блок питания, управления и нагрузка остаются без изменений, они представлены на рис. 2.

Параметры модели занесены в таблицу 1. Содержание блока Subsystem представлено на рис. 3а. Блоки Fcn, Fcn1, Fcn2 вычисляют модулирующие сигналы управления транзисторам в плечах А, В, С инвертора соответственно по выражениям:

$$u_A = u(1) \sin(u(2)*u(3)),$$

$$u_B = u(1) \sin(u(2)*u(3) - 2*\pi/3),$$

$$u_C = u(1) \sin(u(2)*u(3) + 2*\pi/3).$$

На рис. 3б показано окно настройки блока Fcn. Пилообразное напряжение несущей частоты, генерируемое блоком Control System, имеет амплитуду 1 В. Поэтому величина сигнала блока Meg равна коэффициенту модуляции инвертора (см. уравнение 1). На вход блока Subsystem (рис. 2) подано три сигнала: u(1) — амплитуда модулирующего напряжения (блок Mag), u(2) — угловая частота модулирующего напряжения  $\omega = 2\pi f$ , где  $f = 25$  Гц (блок Omega) и u(3) — текущее время (блок Clock).

Во всех моделях шаг дискретизации (Max Step Size = 1e-4).

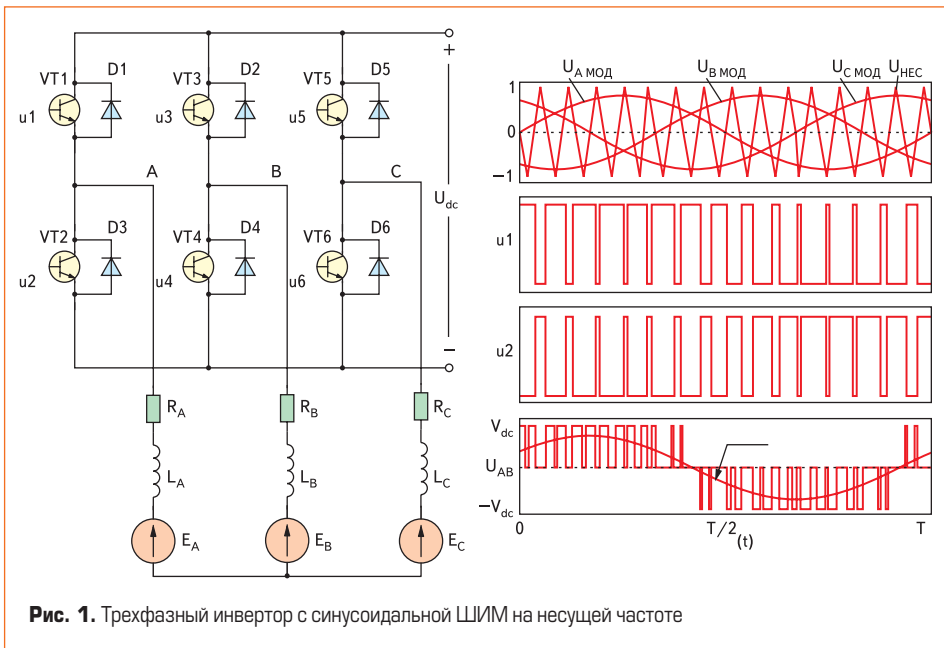


Рис. 1. Трехфазный инвертор с синусоидальной ШИМ на несущей частоте

Таблица 1

Библиотека	Блок	Параметры
Powerlib-Extras / Control Blocks	<b>Control system</b> — генератор сигналов ШИМ	Carrier frequency (Hz) — 500, Modulation index — 0,9, флажок в поле Internal generation of modulating signal снят
SimPowerSystems\Electrical Sources	<b>U<sub>dc</sub></b> — источник постоянного напряжения	Amplitude (V) — 540 В
SimPowerSystems\Power Electronics	<b>Universal Bridge</b> — универсальный мост	Number of bridge arms — 3 Snabber resistance Rs (Ohm) — 1e5, Snabbers capacitance Cs — inf, Power Electronic devices — IGBT/Diodes, Measurements — All voltages and currents
SimPowerSystems\Elements	<b>Three-Phase RL branch</b> — трехфазная RL цепь Resistance Inductance	10 Ом, 0,1 Гн
Simulink Library/Source	<b>Mag, Omega (блоки Contant)</b> — источники постоянного сигнала, <b>Clock</b> — источник времени	-

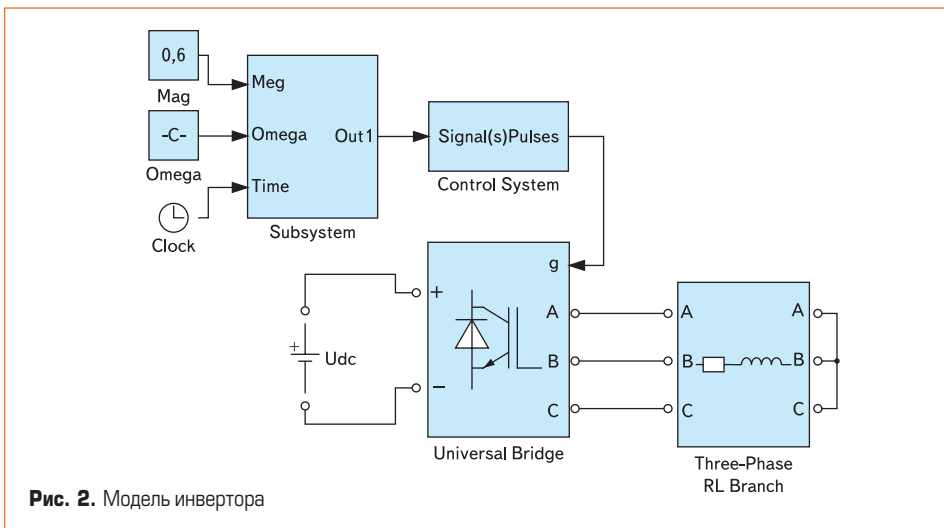


Рис. 2. Модель инвертора

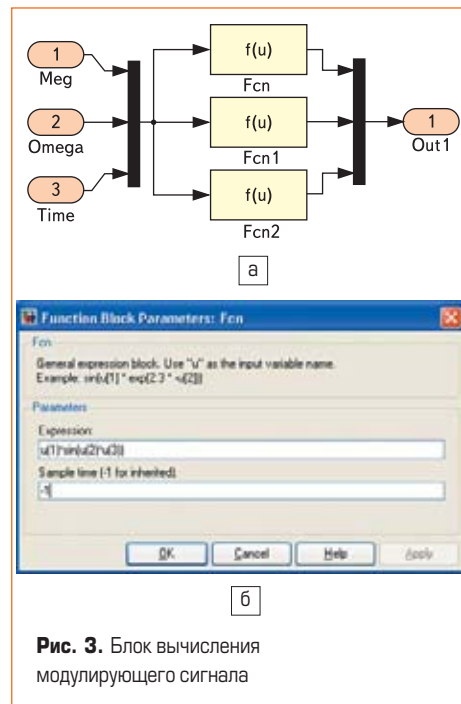


Рис. 3. Блок вычисления модулирующего сигнала

**Квазиустановившиеся характеристики**

Квазиустановившиеся процессы являются основой для изучения физических явлений в инверторе, для реализации спектрального анализа и, в конечном итоге, получения основных аналитических соотношений для расчета перечисленных выше статических характеристик.

**Пример 1.** Модель для снятия электромагнитных квазиустановившихся процессов и спектрального анализа представлена на рис. 4. Параметры блоков измерения модели, выделенные желтым цветом, приведены в таблице 2. Время моделирования — 0,2 с, Max step time —  $1e-4$  с.

Напряжение на фазе A нагрузки и его спектр, полученные при определенной настройке осциллографа с помощью блока Powergui (Урок 5), представлены на рис. 5.

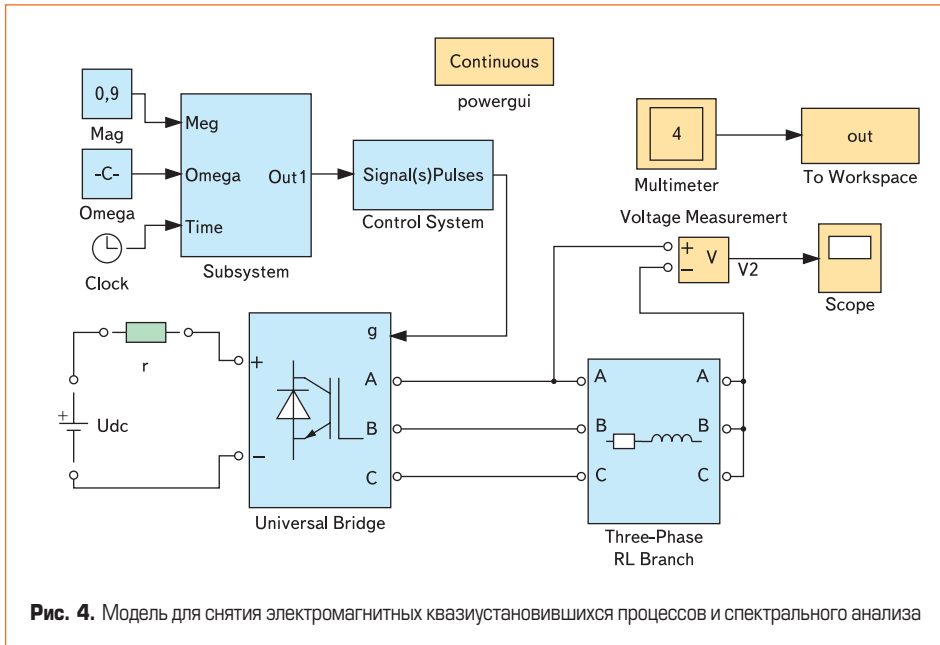


Рис. 4. Модель для снятия электромагнитных квазиустановившихся процессов и спектрального анализа

Таблица 2

Библиотека	Блок	Параметры
SimPowerSystems\Measurement	<b>Voltage Measurement</b> — измеритель напряжения	—
Simulink Library/Sinks	<b>Scope</b> — осциллограф	Уроки 5, 6
Simulink Library/Sinks	<b>To Workspace</b> — блок записи измерений в рабочее пространство	Variable name — out, Limit data to last — 400, Decimation — 1, Sample time — $1e-4$ , Save format — Array
SimPowerSystems\Measurement	<b>Multimeter</b> — измеритель переменных	Урок 2
SimPowerSystems	<b>Powergui</b> — графический интерфейс пользователя	Урок 4, 5

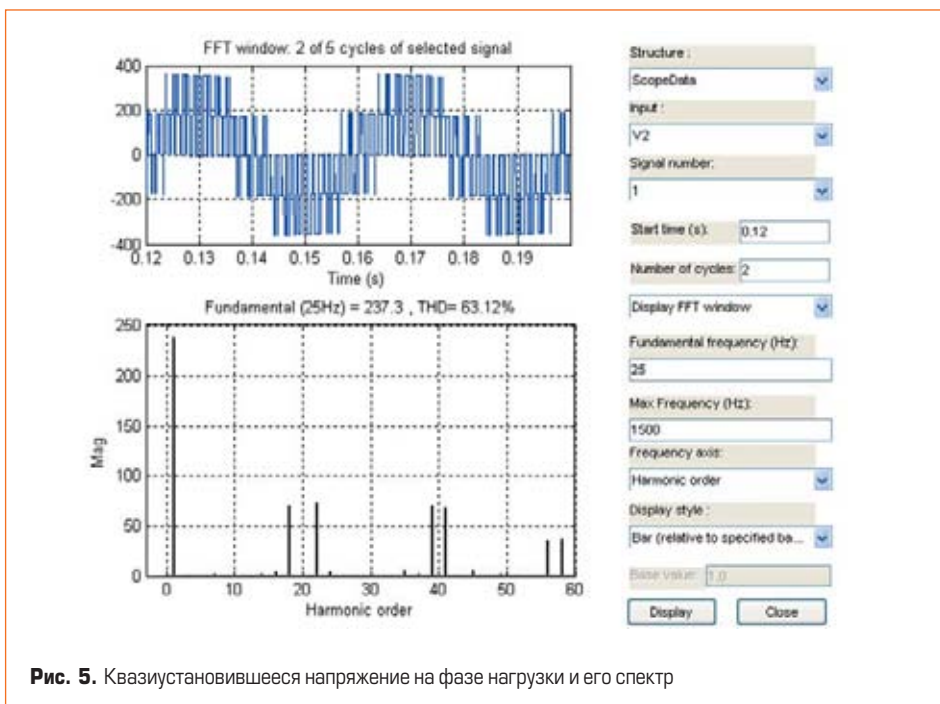


Рис. 5. Квазиустановившееся напряжение на фазе нагрузки и его спектр

Ширина импульса изменяется по синусоидальному закону с частотой 25 Гц, коэффициент модуляции  $m = 0,9$ . Сопротивление ( $r = 0,1$  Ом), включенное в источник питания, моделирует внутреннее сопротивление источника и позволяет измерить ток источника блоком Multimeter. Этот блок последовательно измеряет ток нагрузки, ток в полупроводниковых ключах SW1, SW2\* плеча A инвертора и ток в цепи питания.

Таблица 3

25 Hz Fund	237,31
450 Hz (h18)	70,74
550 Hz (h22)	72,59
975 Hz (h39)	69,72
1025 Hz (h41)	67,94
1400 Hz (h56)	35,71
1450 Hz (h58)	36,14
1550 Hz (h62)	34,74
1600 Hz (h64)	36,80

В таблице 3 приведены цифровые данные гармонических составляющих фазного напряжения на выходе инвертора. Из рис. 5 и табл. 3 следует, что спектр напряжения содержит основную частоту модуляции (25 Гц) и боковые частоты, располагающиеся справа и слева от гармоник, кратных отношению несущей частоты (500 Гц в нашем случае) к частоте модуляции.

Результаты моделирования записываются в рабочее пространство блоком To Workspace, квазиустановившиеся токи строятся при выполнении программы, представленной в листинге 1.

Листинг 1

```

t=0:1e-4:399*1e-4; %Задание времени
i_Load=out(:,1); %Создание переменной тока нагрузки
i_SW1=out(:,2); %Создание переменной тока SW1
i_SW2=out(:,3); %Создание переменной тока SW2
i_dc=out(:,4); %Создание переменной тока питания
subplot(2,1,1);
plot(t,i_Load,t,i_dc); %Построение токов нагрузки и питания
ylabel('i Load, i dc (A)');
grid on;
legend('i Load','i dc','Location','Best');
subplot(2,1,2);
plot(t,i_SW1,t,i_SW2); %Построение токов в пп ключах фазы A
xlabel('Time');
ylabel('i SW1, i SW2 (A)');
grid on;
legend('i SW1','i SW2','Location','Best');
    
```

Выполнение программы приводит к построению квазиустановившихся процессов, показанных на рис. 6.

Из рассмотрения электромагнитных процессов следует, что ток нагрузки равен алгебраической сумме токов ключей SW1 и SW2. При этом на полупериоде, когда модулирующее напряжение положительно, ток течет через VT1, а при его запирации вследствие наличия индуктивности в нагрузке ток переключается на диод D2. Аналогично при отрицательном модулирующем напряжении ток проводят VT2 и D1. Ток нагрузки содержит «гладкую составляющую» (первую гармонику) и пульсирующую

\* Ток полупроводникового ключа SW складывается из тока через транзистор VT и тока через параллельно включенный диод D (рис. 1).

щую составляющую, величина которой зависит от частоты несущего пилообразного сигнала и постоянной времени нагрузки. Амплитуда «гладкой составляющей» определяется из выражения

$$I_m(1) = \frac{U_m(1)}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}, \quad (2)$$

где  $U_m(1)$ ,  $I_m(1)$  — амплитудные значения первых гармоник фазного напряжения и тока нагрузки.

Амплитуду пульсирующей составляющей можно определить по приближенной формуле, учтя при этом, что она определяется гармониками, которые расположены ближе всех к первой. В данном случае — это 18 и 22 гармоники (таблица 3). Поскольку амплитуды гармонических напряжений на этих гармониках примерно равны, то имеем: (3) (см. внизу страницы) где  $U_m(18)$ ,  $U_m(22)$  — амплитуда напряжений на 18 и 22 гармониках.

При расчете потерь в полупроводниковых элементах инвертора следует иметь в виду, что конструктивно инвертор (или, по крайней мере, плечо инвертора), как правило, представляет собой интегрально модульную конструкцию, в которой тепловые потери распределяются равномерно. Поэтому такие потери следует рассчитывать на все плечо. Поскольку прямое падение напряжения и прямое сопротивление открытого транзистора и диода практически одинаковы, то потери в плече инвертора в квазиустановившемся режиме можно рассчитать по формуле

$$P_{SW} = \frac{R_{on}(I_m^2(1) + \Delta I_m^2)}{2} + \frac{2U_f I_m(1)}{\pi} = R_{on}(I^2(1) + I_m^2(18)) + \frac{2U_f I_m(1)}{\pi}, \quad (4)$$

где  $P_{SW}$  — мощность потерь в плече инвертора,  $R_{on}$  — сопротивление открытого полупроводникового ключа,  $U_f$  — падение напряжения на открытом ключе,  $I(1) = \frac{I_m(1)}{\sqrt{2}}$  — действующий (эффективный) ток первой гармоники.

Средний ток в источнике питания рассчитывается по выражению

$$I_{dc} = \frac{3I_m(1)}{\pi} \left( \cos\varphi - \cos\left(\frac{\pi}{3} - \varphi\right) \right), \quad (5)$$

где  $\varphi = \arctg(\omega L/R)$  — сдвиг фазы между первыми гармониками тока и напряжения в нагрузке.

Полная и активная мощность в нагрузке определяется по уравнениям:

$$S_{Load} = \frac{3U_m(1)I_m(1)}{2}, \quad (6)$$

$$P_{Load} = \frac{3U_m(1)I_m(1)}{2} \cos\varphi.$$

$$\Delta I_m = \sqrt{\left(\frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (18\omega L)^2}}\right)^2 + \left(\frac{U_m(22)}{\sqrt{R^2 + (22\omega L)^2}}\right)^2} + \frac{\sqrt{2}U_m(18)}{\sqrt{R^2 + (18\omega L)^2}} = \sqrt{2}I_m(18), \quad (3)$$

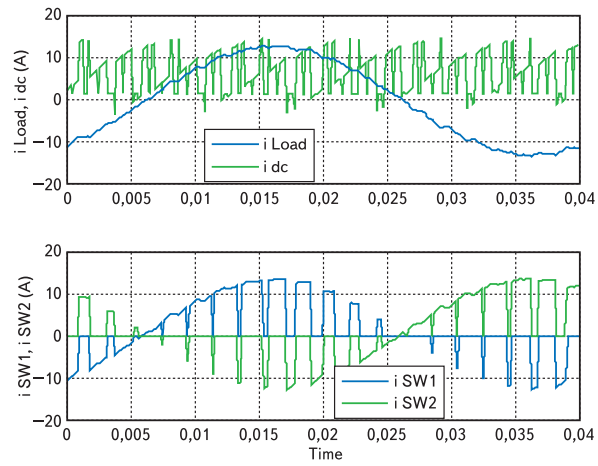


Рис. 6. Квазиустановившиеся токи в инверторе

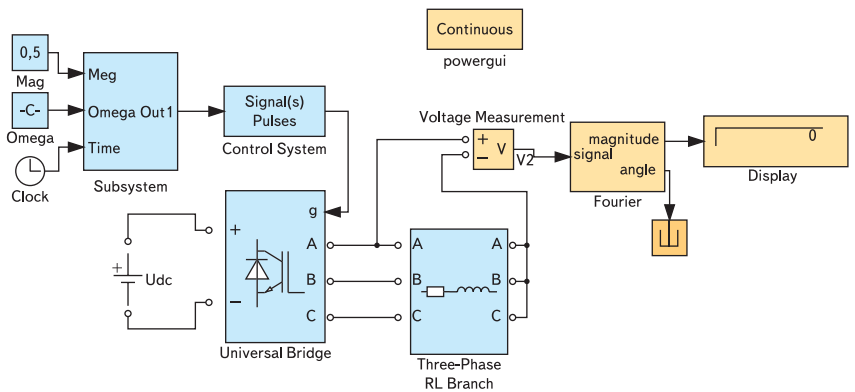


Рис. 7. Модель для снятия регулировочной характеристики

Таблица 4

Библиотека	Блок	Параметры
Powerlib/Extra Library/Measurements	<b>Fourier</b> — блок разложения в ряд Фурье	Fundamental Frequency of output voltage(Hz) — 25, Harmonic (n) — 1
Simulink Library/Sinks	<b>Display</b> — цифровой измеритель	Format — Short, Decimation — 1

Мощность в источнике питания равна

$$P_{Source} = U_{dc} \times I_{dc} \quad (7)$$

### Статические характеристики трехфазного инвертора

Статические характеристики инвертора можно получить различными способами. Рассмотрим три из них, в которых используются программные средства MATLAB и связь MATLAB с MS Office.

Ниже каждый из способов рассматривается на конкретном примере получения определенной статической характеристики. Однако необходимо подчеркнуть, что любой из рассмотренных способов позволяет получить все статические характеристики.

**Пример 2.** Расчет и построение регулировочной характеристики

Получение регулировочной характеристики осуществляется на модели, представленной на рис. 7. Параметры блоков измерения амплитуды первой гармоники выходного напряжения приведены в таблице 4.

Получение регулировочной характеристики осуществляется методом, который обычно используется на реальных установках, когда при включенной схеме изменяется входной сигнал и измеряется выходное напряжение. Для этого

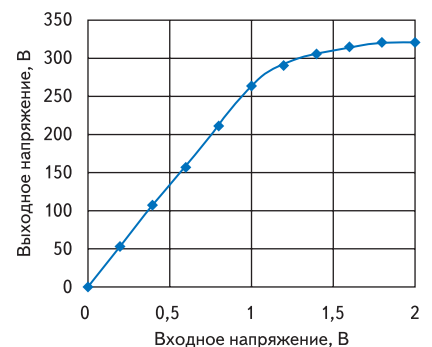


Рис. 8. Регулировочная характеристика АИН

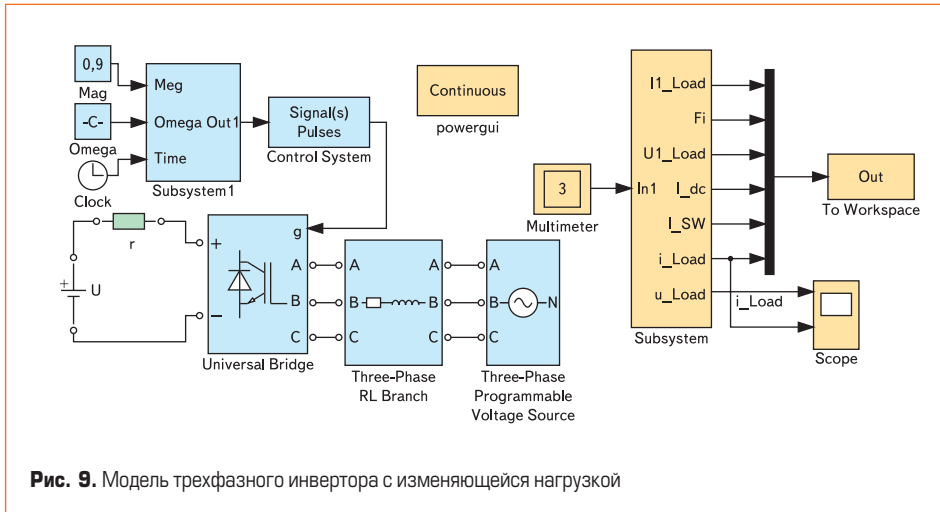


Рис. 9. Модель трехфазного инвертора с изменяющейся нагрузкой

в модели время симуляции выбирается бесконечным (inf) и с определенным шагом (в данном случае с шагом 0,2 В) изменяется напряжение блока Mag. По результатам измерения строится регулировочная характеристика (рис. 8).

Из рис. 8 видно, что инвертор является линейным звеном в диапазоне изменения коэффициента модуляции  $0 < m < 1$ . При  $m > 1$  регулировочная характеристика становится нелинейной. По регулировочной характеристике определяется коэффициент усиления инвертора как звена в системе регулирования.

**Пример 3.** Расчет и построение внешней (нагрузочной) и электромагнитных характеристик инвертора

В рассматриваемом модельном эксперименте ток нагрузки в течение времени моделирования изменяется за счет изменения противоЭДС с такой скоростью, при которой можно пренебречь падением напряжения на индуктивности нагрузки ( $L \frac{di}{dt} \ll Ri$ ). Модель трехфазного инвертора с изменяющимся источником противоЭДС, включенным последовательно с нагрузкой, показана на рис. 9.

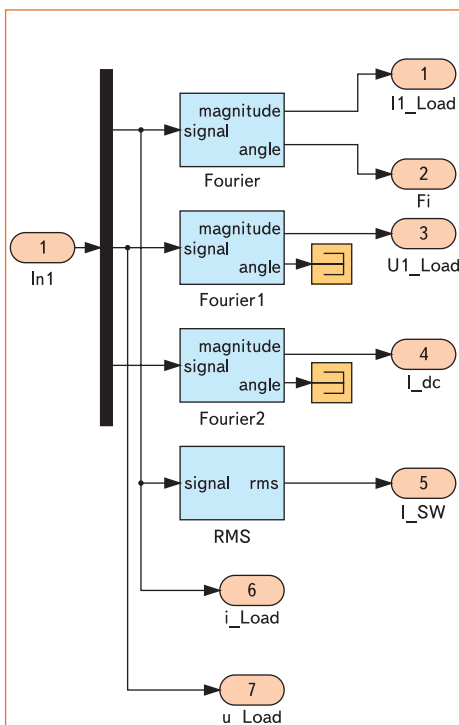


Рис. 11. Измерительная часть модели

Время моделирования — 1,0 с, шаг дискретизации (Max Step Size =  $1e-4$ ), коэффициент модуляции  $m = 0,9$ .

Блоком Multimeter последовательно измеряются значения тока нагрузки, напряжения нагрузки и тока в цепи питания инвертора.

Программируемый источник, окно настройки которого показано на рис. 10, предназначен для изменения нагрузки инвертора в течение моделирования.

Измерительная часть модели содержит четыре блока. Содержание блока Subsystem представлено на рис. 11.

В этом блоке последовательно определяются:

- амплитуда первой гармоники тока нагрузки (блок Fourier);
- фаза первой гармоники тока нагрузки (блок Fourier);
- амплитуда первой гармоники линейного напряжения нагрузки (блок Fourier 1);
- средний ток питания инвертора (блок Fourier 2);

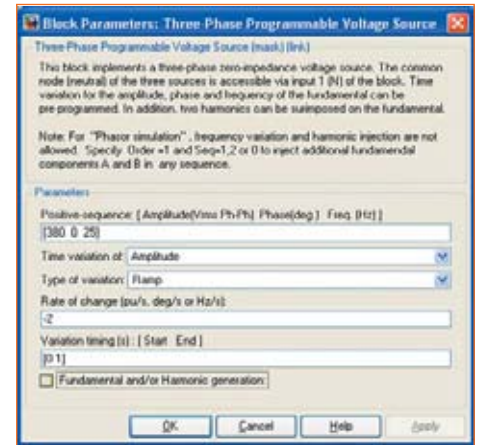


Рис. 10. Программируемый источник противо ЭДС в нагрузке АИН

- эффективный ток в полупроводниковом плече инвертора (блок RMS);
- мгновенные ток и напряжение нагрузки.

Блок To Workspace служит для записи в рабочее пространство MATLAB величин, измеренных блоком Subsystem. При выставленном флажке в поле Limit data points to last (максимальное количество записанных измерений) в рабочее пространство записывается число проставленных в поле конечных измерений (начальные измерения обрезаются). При этом время записи равно произведению числа измерений на максимальный шаг дискретизации. В данном случае  $t = 8000 \times 10^{-4} = 0,8$  с. Такой прием позволяет исключить данные переходного процесса в схеме.

Для построения статических характеристик служит программа, представленная в листинге 2. Нагрузочная и электромагнитные характеристики, рассчитанные и построенные программой, показаны на рис. 12.

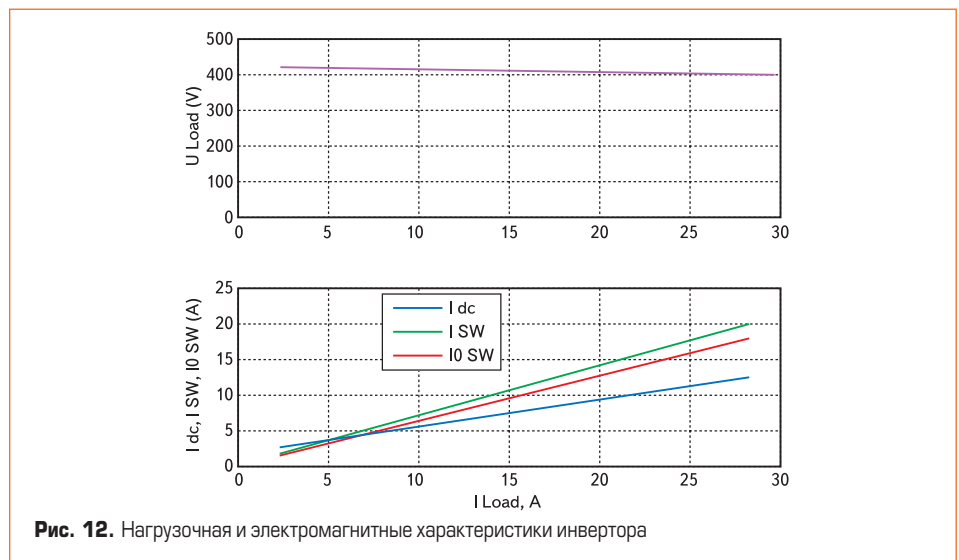


Рис. 12. Нагрузочная и электромагнитные характеристики инвертора

Таблица 5

Библиотека	Блок	Параметры
SimPowerSystems\Electrical Sources	<b>Three-Phase Source</b> — трехфазный источник	Phase to Phase rms voltage(V) — E, Phase angle of phase A(degree) — 0, Frequency (Hz) — 25, Internal connection — (Y), Source resistance (Ohm) — 0,2, Source inductance (H) — 0.
Simulink Library/Sinks	<b>To Workspace</b> — блок записи измерений в рабочее пространство	Variable name — Out, Limit data to last — 1, Decimation — 1, Sample time — $1e-4$ , Save format — Array

Программа, представленная листингом 2, рассчитывает также мощность в нагрузке и в цепи питания, что позволяет построить энергетические характеристики инвертора. Однако эта задача оставлена для рассмотрения следующего способа построения статических характеристик.

**Листинг 2**

```

I1Load=Out(:,1); %Амплитуда первой гармоники тока нагрузки
Fi=Out(:,2); %Фаза тока нагрузки
U1Load=Out(:,3); %Амплитуда первой гармоники линейного
напряжения нагрузки
I_dc=Out(:,4); %Средний ток источника питания
I_SW=Out(:,5); %Эффективный ток в пп плече инвертора
I0_SW=2*I1Load/pi; %Средний ток в пп плече инвертора
P_dc=540*I_dc; %Мощность в источнике
SLoad=(1.73*U1Load.*I1Load)/2; %Полная мощность в нагрузке
PLoad=S11.*cos(0-Fi*pi/180); %Активная мощность в нагрузке
subplot(2,1,1);
plot(I1Load, U1Load); %Нагрузочная характеристика
grid on;
ylabel('U Load (V)');
subplot(2,1,2);
plot(I1Load, I_dc, I1Load, I_SW, I1Load, I0_SW);
%Электромагнитные характеристики
grid on;
xlabel('I Load (A)');
ylabel('I dc, I SW, I0 SW (A)');
legend('I dc','I SW','I0 SW','Location','Best');
    
```

**Пример 4.** Расчет и построение энергетических характеристик инвертора

Первоначально рассмотрим вопрос интегрирования MATLAB и Excel, что позволяет пользователю Excel обращаться к многочисленным функциям MATLAB для обработки данных, различных вычислений и визуализации результатов. Надстройка excellink.xla реализует перечисленные возможности Excel.

Для настройки Excel на совместную работу с MATLAB следует после запуска Excel в меню *Сервис* выбрать пункт *Надстройки*. В открывшемся окне (рис. 13), используя кнопку *Обзор*, указать путь к файлу *excellink.xla*. Следует обратить внимание, что при выполненной настройке на панели инструментов Excel появляются четыре дополнительные кнопки — *startmatlab*, *putmatrix*, *getmatrix*, *evalsring*. Данные кнопки реализуют основные действия, требующиеся для осуществления взаимосвязи между Excel и MATLAB — обмен матричными данными и выполнение команд MATLAB из среды Excel.

Расчет и построение энергетических характеристик инвертора осуществляется на модели, показанной на рис. 14.

Данные блоков, отличающих эту модель от рассмотренных выше, представлены в таблице 5. Из таблицы следует, что значение противоЭДС (E) берется из рабочего пространства MATLAB.

В блоке *Multimeter* последовательно измеряются:

- ток нагрузки;
- напряжение нагрузки;
- ток питания инвертора.

Содержание измерительной части модели (блок *Subsystem*, рис. 14) представлено на рис. 15. В этом блоке в отличие от блока, показанного на рис. 11, дополнительно определяется амплитуда восемнадцатой гармоники тока в полупроводниковом плече инвертора (блок *Fourier3*). Блоки *Subsystem 1*, *Subsystem 2* построены аналогично представленному на рис. 3. В блоке *Subsystem 1* вычисляются полная и активная мощность в нагрузке

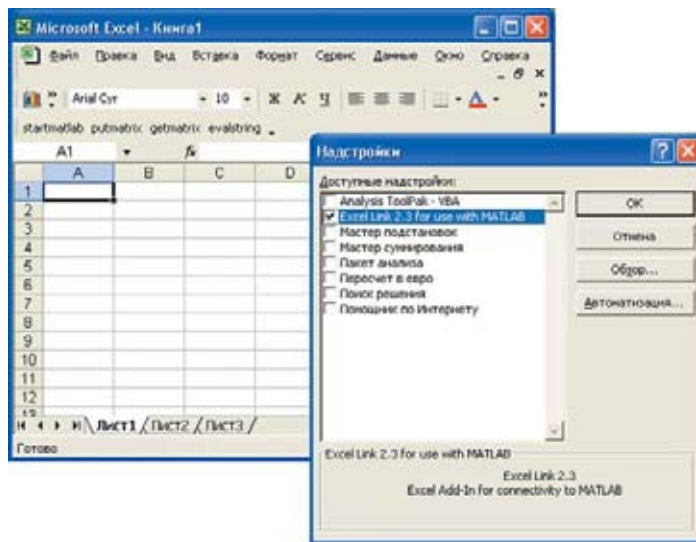


Рис. 13. Диалоговое окно настройки

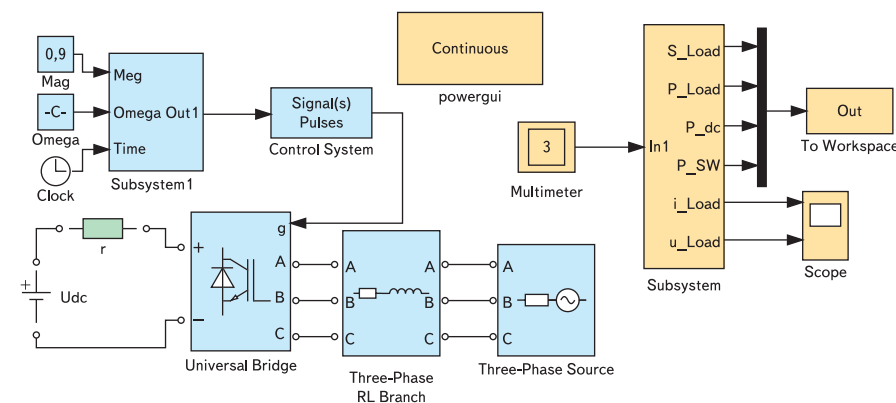


Рис. 14. Модель для исследования энергетических характеристик инвертора

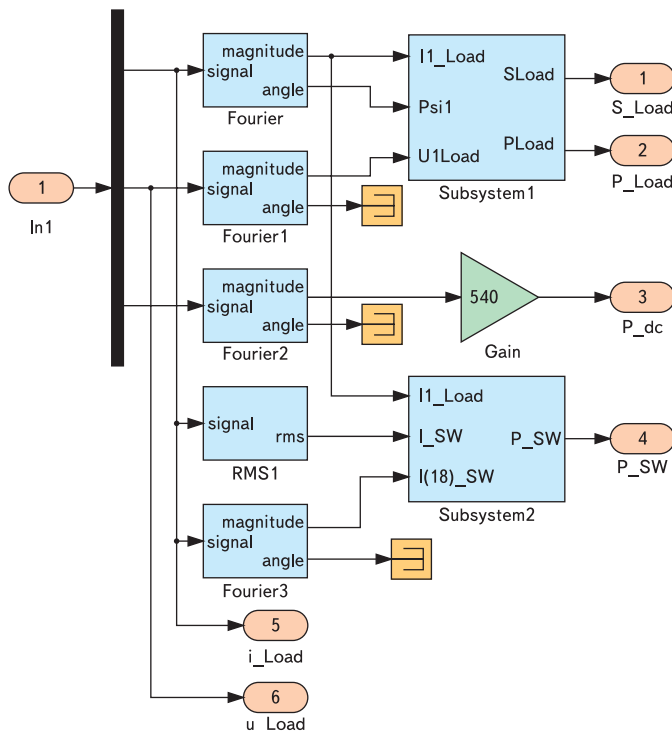


Рис. 15. Блок измерения

по уравнению (6). В блоке Subsystem 2 вычисляется мощность потерь в полупроводниковом плече по уравнению (4). Время симуляции 0,2 с, коэффициент модуляции 0,9.

Моделирование осуществляется для нескольких значений противоЭДС нагрузки за счет реализации цикла, представленного в листинге 3. При запуске файла (листинг 3) запускается модель (рис. 14), и для каждого значения противоЭДС (вторая строка в листинге) осуществляется симуляция, результаты которой записываются в матрицу A (четвертая строка листинга).

```

Листинг 3
for k=0:1:6;
E=300-(300/6)*k
sim('AIN_3f_P')
A(k+1,:)=Out
end
SLoad=Out(:,1); %Полная мощность в нагрузке
PLoad=Out(:,2); %Активная мощность в нагрузке
P_dc=Out(:,3); %Мощность источника питания
P_SW=Out(:,4); %Мощность потерь в пп плече
    
```

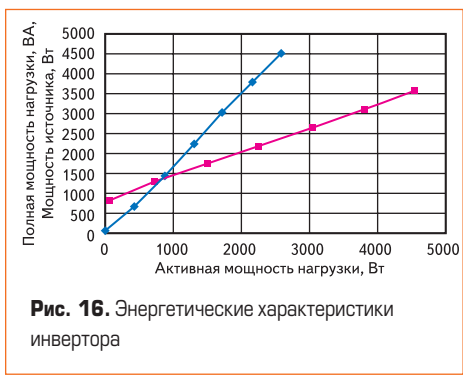
Данные матрицы A передаются в Excel при выполнении команды *getmatrix*. По этим данным строятся энергетические характеристики инвертора (рис. 16, 17)

**Динамические характеристики трехфазного инвертора**

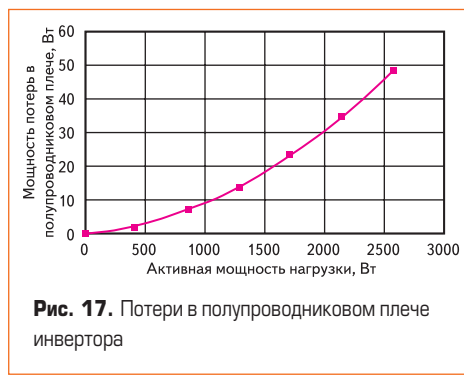
Автономный инвертор напряжения в системе регулирования является нелинейным звеном с дискретно изменяющимися параметрами. Эта нелинейность проявляется в том, что запаздывание выходного напряжения в переходном процессе относительно входного сигнала зависит от момента изменения входного сигнала относительно пилообразного несущего напряжения и от величины изменения входного сигнала. Частота несущего пилообразного напряжения в современных системах значительно превышает полосу пропускания системы. Поэтому чаще всего АИН рассматривается как безынерционное звено. Если в качестве выходной величины рассматривается действующий ток нагрузки, то динамика АИН определяется динамическими свойствами нагрузки. Модельное исследование динамики АИН в этом случае подробно описано в уроке 5. Иногда инвертор заменяется линейным апериодическим звеном, постоянная времени которого принимается равной периоду несущего пилообразного напряжения.

Модельное исследование динамики инвертора позволяет построить функциональную модель, отражающую физику его работы. Эта модель строится во вращающейся системе координат с использованием метода результирующего вектора. При этом переменные состояния в модели соответствуют их амплитудным значениям. Такая модель приведена на рис. 18.

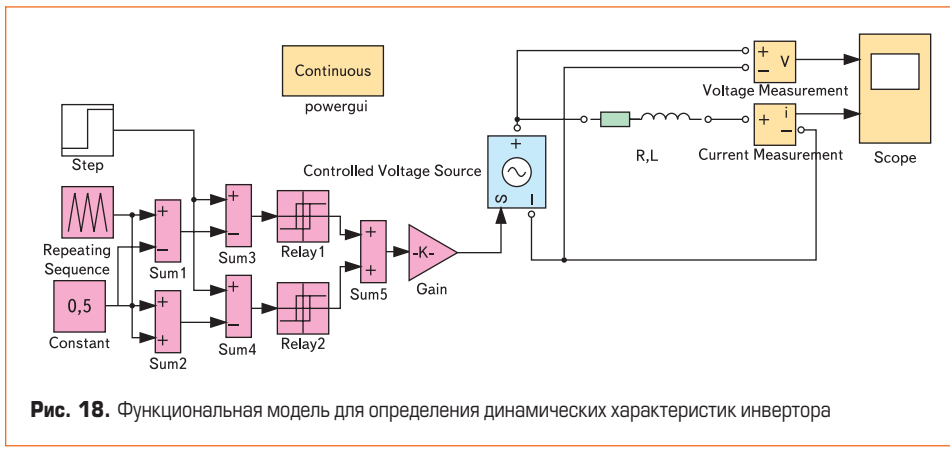
Функциональная модель инвертора здесь выделена сиреневым цветом и реализована с использованием блоков основной библиотеки Simulink. Активно-индуктивная нагрузка инвертора реализована с использованием блоков библиотеки SimPowerSystem. Параметры блоков, не вошедшие в предыдущие модели, занесены в таблицу 6. Время моделирования 0,08 с, шаг дискретизации 1e-4.



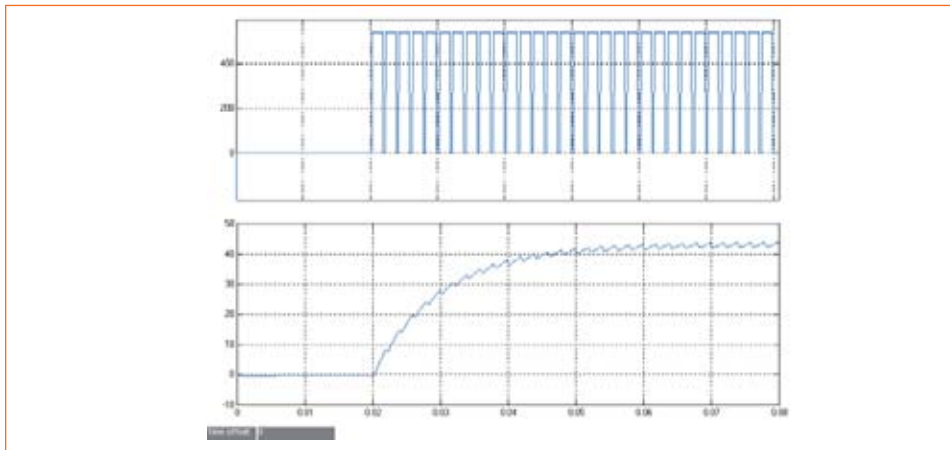
**Рис. 16.** Энергетические характеристики инвертора



**Рис. 17.** Потери в полупроводниковом плече инвертора



**Рис. 18.** Функциональная модель для определения динамических характеристик инвертора



**Рис. 19.** Переходные процессы в АИН

Переходный процесс в модели показан на рис. 19. На верхней осциллограмме представлено линейное напряжение на выходе АИН при скачке входного сигнала, на нижней — ток в фазе нагрузки. Задержка реакции напряжения здесь составляет величину 2,5 мс, эта за-

держка практически не влияет на характер переходного процесса по току, что подтверждает возможность представления инвертора безынерционным звеном.

Блок Universal bridge не позволяет промоделировать переходные процессы при пере-

**Таблица 6**

Библиотека	Блок	Параметры
Simulink Library/Source	<b>Step</b> — источник скачкообразного входного сигнала	Step time 0,02 с, Initial vale 0, Final value 0,8, Sample time — 1e-4.
Simulink Library/Source	<b>Repeating Sequence</b> — генератор пилообразного напряжения с периодом 2 мс	Time values: 0 1e-3 1e-3 2e-3, Output values: -0,5 0,5 0,5 -0,5.
Simulink Library/Source	<b>Constant</b> — источник постоянного сигнала	Constant value 0.5.
Simulink Library/Math Operation	<b>Sum 1, 2, 3, 4, 5</b> — сумматоры	-
Simulink Library/Math Operation	<b>Gain</b> — усилитель	Gain 540, Sample time 1e-4.
Simulink Library/Discontinuities	<b>Relay 1, 2</b> — релейные элементы	Relay 1: Switch on point — 0,001, Switch off point — 0,001, Output when on 1, Output when off 0, Sample time 1e-4. Relay 2: Switch on point - 0,001, Switch off point — 0,001, Output when on 0, Output when off — 1, Sample time 1e-4.
SimPowerSystems\Electrical Sources	<b>Controlled Voltage Source</b> — управляемый источник напряжения	Source type DC, Initial amplitude 0 В

ключении полупроводниковых ключей инвертора, так как в его параметрах учитывается только время запаздывания при выключении. Вообще возможности пакета Power System моделировать динамические процессы в полупроводниковых элементах очень ограничены. Для решения таких задач предпочтительней использовать пакеты схемотехнического направления (OrCAD, Workbench, P-CAD, DesignLab, Micro Cap и др.)

### Заключение

Для решения конкретных задач при исследовании устройств силовой электроники далеко не всегда требуется расчет всех рассмотренных характеристик. Кроме того, инженера могут интересовать свойства, отличные от рассмотренных. В любом случае, практически любые

задачи решаются при наличии модели исследуемого устройства. Разработанная модель выполняет роль лабораторного стенда, который позволяет без боязни что-либо испортить задавать и исследовать любые режимы и характеристики.

### Литература

1. Ануфриев И., Смирнов А., Смирнова Е. MATLAB 7. Наиболее полное руководство. СПб.: БХВ-Петербург, 2005.
2. Герман-Галкин С. Г. Школа MATLAB. Урок 6. Программные и инструментальные средства представления результатов моделирования // Силовая электроника. 2007. № 4.
3. Худяков В. Моделирование устройств силовой электроники. Урок 1. Основные инструменты Simulink // Силовая электроника. 2005. № 1.
4. Худяков В. Школа MATLAB. Урок 2. Библиотека SimPowerSystem // Силовая электроника. 2005. № 2.
5. Худяков В. Школа MATLAB. Урок 3. Построение SPS моделей с полупроводниковыми элементами // Силовая электроника. 2005. № 3.
6. Худяков В. Школа MATLAB. Урок 4. Анализ динамических свойств устройств силовой электроники во временной области // Силовая электроника. 2005. № 4.
7. Худяков В. Школа MATLAB. Моделирование устройств силовой электроники. Урок 5. Анализ устройств силовой электроники в частотной области // Силовая электроника. 2006. № 1.
8. Черных В. Simulink — среда создания инженерных приложений. М.: ДИАЛОГ и МИФИ, 2004.