

Школа MATLAB

Урок 5. Анализ свойств устройств силовой электроники в частотной области

Цель настоящего урока — изучение средств виртуального моделирования, которые используются для анализа свойств устройств силовой электроники в частотной области, а именно: гармонический анализ сигналов, построение передаточных функций отдельных узлов для получения амплитудно- и фазочастотных характеристик. Для этого предназначены блоки библиотек *Simulink* и *SimPowerSystems* и вспомогательные средства, включая элементы программирования. Чтобы усвоить материал данного раздела, необходимо предварительно ознакомиться с содержанием уроков 1–4.

**Владимир Худяков,
Д. Т. Н.,**

kaf21@aanef.ru

Построение амплитудных спектров тока и напряжения на выходе транзисторного инвертора

Начнем рассмотрение частотных свойств устройств силовой электроники с построения виртуальной модели инвертора, предназначенного для преобразования постоянного напряжения в напряжение синусоидальной формы. Это преобразование осуществляется за счет широтно-импульсной модуляции (ШИМ) в цепи переменного тока. Устройство выполнено на ключевых элементах, работающих с высокой частотой коммутации [1].

Пример 1. Построить модель транзисторного инвертора с активно-индуктивной нагрузкой.

Исходные данные для модели: входное постоянное напряжение величиной 310 В, частота преобразования 1 кГц, модулирующая частота 50 Гц и коэф-

фициент модуляции 0,95. Сопротивление нагрузки 10 Ом, а индуктивность — 5 мГн. В качестве ключевых элементов используются MOSFET-транзисторы, соединяемые по мостовой схеме и управляемые от генератора импульсного сигнала с ШИМ.

На рис. 1а представлена схема модели, а блоки, входящие в модель, и их основные параметры приведены в таблице 1.

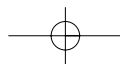
В рассматриваемой модели используется новый блок генератора дискретных сигналов с ШИМ — **Discrete PWM Generator** (табл. 1). Дадим краткие сведения по его настройкам в окне параметров (рис. 1б), которое вызывается двойным щелчком левой кнопкой мыши (далее: ЛКМ) по пиктограмме генератора.

- **Params** — параметры.
- **Generator Mode** — генератор моды (модулированного сигнала). Выбирается из списка:
 - *1-arm bridge (2 pulses)* — мост с одним плечом (2 импульса);
 - *2-arm bridge (4 pulses)* — мост с двумя плечами (4 импульса);
 - *3-arm bridge (6 pulses)* — мост с тремя плечами (6 импульсов);
 - *Double 3-arm bridge (12 pulses)* — двойной мост с тремя плечами (12 импульсов);
- **Carrier frequency (Hz)** — несущая частота (Гц);
- **Sample time** — шаг дискретизации;
- **Internal generation of modulating signal(s)** — внутренний (встроенный) генератор модулирующего сигнала(ов). Включен при установленном флажке.
- **Modulation index** — коэффициент (индекс) модуляции (от 0 до 1).
- **Frequency of output voltage (Hz)** — частота напряжения на выходе (Гц);
- **Phase of output voltage (degrees)** — фаза напряжения на выходе (градусов).

Значения установленных параметров в генераторе приведены в окне на рис. 1б, причем коэффициент модуляции задан равным 0,95 для того, чтобы были видны процессы переключения транзисторных ключей на каждом периоде импульсного напряжения.

Таблица 1

| Библиотека | Блок | Параметры |
|--|---|---|
| Simulink\Extra Library\Discrete Control Blocks | Discrete PWM Generator — генератор дискретных сигналов с ШИМ | (см. рис. 1б) |
| SimPowerSystems\Electrical Sources | DC Voltage Source — источник постоянного напряжения DC | Amplitude (V) — 310 В |
| SimPowerSystems\Power Electronics | Universal Bridge — универсальный мост | Number of bridge arms — 2 Port configuration — ABC as output terminals Power Electronic devices — MOSFET/Diodes |
| SimPowerSystems\Elements | Series RLC Branch — последовательно соединенные RLC-элементы Resistance Inductance Capacitance | 10 Ом 0,005 Гн C = inf |
| SimPowerSystems\Measurements | Current Measurement — измеритель тока In | — |
| SimPowerSystems\Measurements | Voltage Measurement — измеритель напряжения Um | — |
| Simulink\Sinks | Scope — осциллограф | — |
| SimPowerSystems\Connectors | Ground (output) — заземление (выходное) | — |
| SimPowerSystems\Connectors | L-connector — L-соединитель (для подключения нагрузки) | — |
| SimPowerSystems | Powergui — графический интерфейс пользователя | Sample Time (s) — 1e-5 |



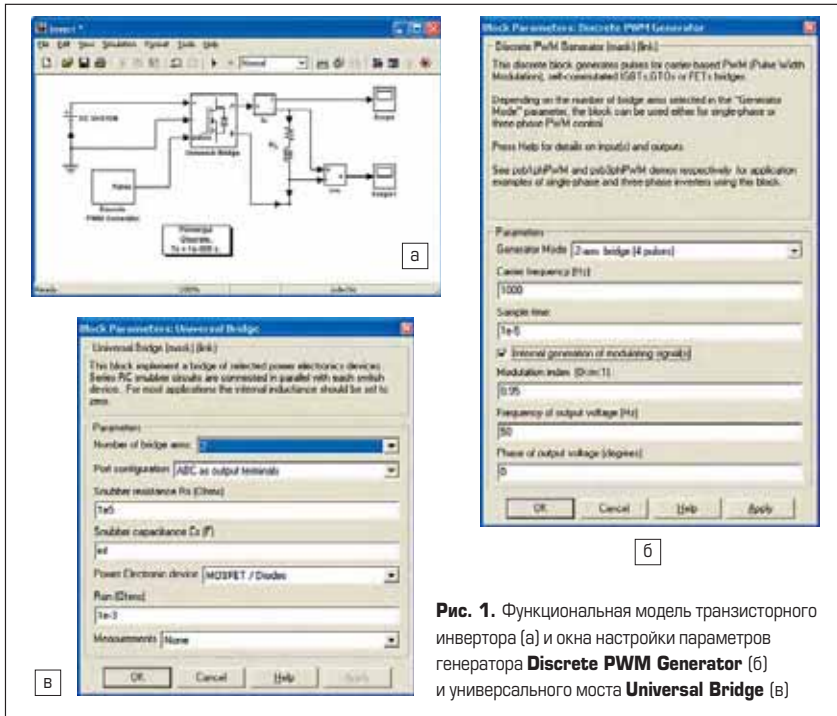


Рис. 1. Функциональная модель транзисторного инвертора (а) и окна настройки параметров генератора **Discrete PWM Generator** (б) и универсального моста **Universal Bridge** (в)

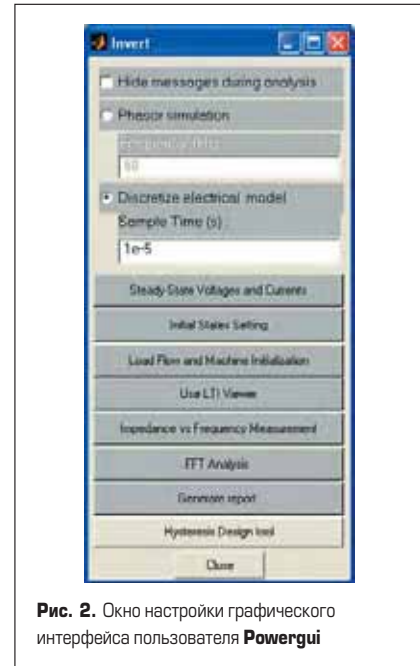


Рис. 2. Окно настройки графического интерфейса пользователя **Powergui**

Выбранная схема универсального моста **Universal Bridge** содержит два плеча, то есть четыре транзистора, а его настраиваемые параметры отражаются в окне (рис. 1в). Настройка осциллографа не должна вызывать трудностей, так как производилась в наших уроках неоднократно. Время моделирования, выбор которого осуществляется в окне модели, названной **Invert**, в меню **Simulation/Simulation parameters**, конечное время **Stop time** задано равным 0,1, а максимальный шаг дискретизации **Max step size** выставлен **auto**. Решатель дифференциальных уравнений целесообразно установить **ode15s**.

Настройка графического интерфейса пользователя **Powergui** состоит в установке шага дискретизации **Sample time** (рис. 2).

После запуска модели получены временные диаграммы для напряжения на RL-нагрузке и тока нагрузки (рис. 3). Видно, что ток нагрузки изменяется по синусоидальному закону с периодом 0,02 с (рис. 3а) и определяется модулирующей функцией. Однако он также содержит высокочастотную составляющую, обусловленную импульсным режимом работы транзисторов с несущей частотой, равной 1 кГц, и относительно малой величиной индуктивности нагрузки L. Данная составляющая в увеличенном масштабе изображена на рис. 3б. Напряжение на нагрузке представляет собой последовательность высокочастотных прямоугольных импульсов. У огибающей этих импульсов частота следования равна 50 Гц (рис. 3в). Сами высокочастотные импульсы имеют переменную ширину, изменяющуюся по закону модулирующей функции, что позволило получить ШИМ (рис. 3г).

Для построения амплитудного спектра тока и напряжения на нагрузке необходимо произвести дополнительные настройки осциллографов. Кнопкой осциллограммы **Params**, упоминавшейся в предыдущих уроках, вы-

зывается известное читателю окно **Scope Params**. С помощью закладки **Data history** окно переключается. В нем снимается флажок ограничения числа запоминаемых точек **Limit data points to last**, а в строке **Variable name** (имя переменной) набирается название переменной, например **In**. В строке **Format** (формат) из выпадающего меню выбирается **Structure with time** (структура и время). Аналогично настраивается другой осциллограф, только наименование переменной устанавливается другое, например **Um**. У графического интерфей-

са пользователя **Powergui** устанавливается шаг дискретизации **Sample time**, составляющий 0,1...0,01 от наименьшего периода сложного сигнала. В рассматриваемом случае наименьшим является период коммутации транзисторных ключей $T = 0,001$, и шаг выбран 0,00001. Пиктограмма **Powergui** в окне модели автоматически обновляется, и в ней отражается величина шага дискретизации (рис. 1а на схеме внизу).

Вновь запускается выполнение модели. Затем после окончания моделирования двойным нажатием ЛКМ на пиктограмму **Powergui** открывается окно этого интерфейса (рис. 2),

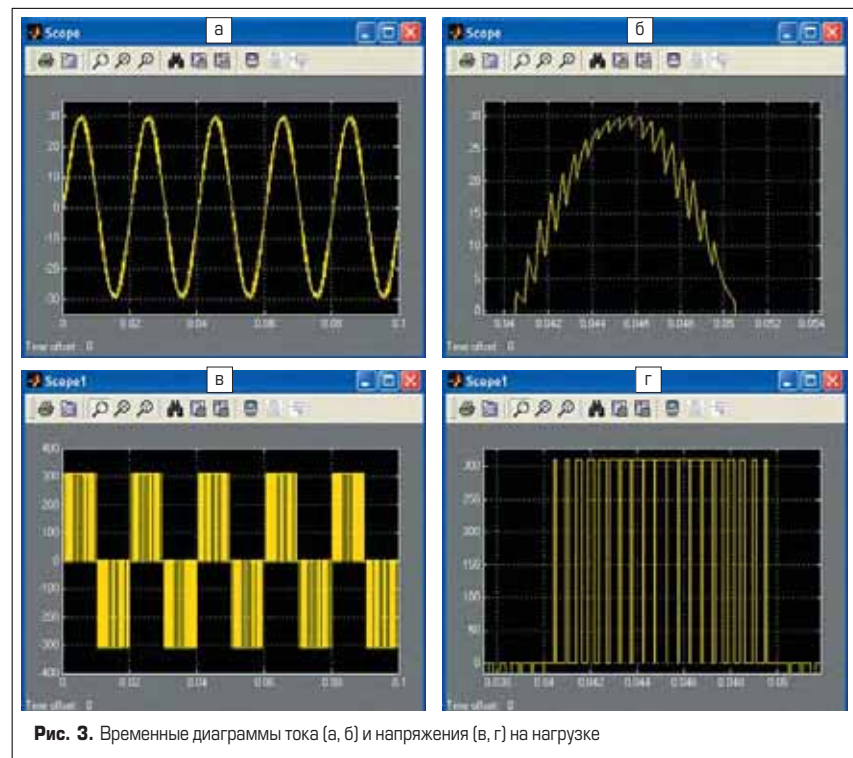
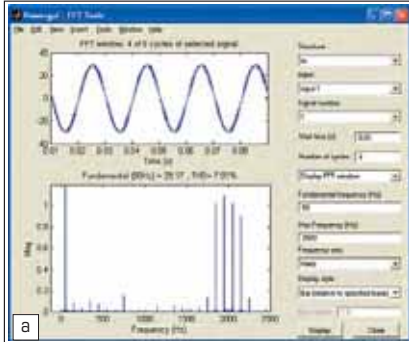


Рис. 3. Временные диаграммы тока (а, б) и напряжения (в, г) на нагрузке

в котором одним нажатием на клавишу FFT Analysis вызывается другое окно для настройки и наблюдений с названием **Powergui: FFT Tools** (рис. 4). Основные органы управления указанным окном (справа и сверху вниз):

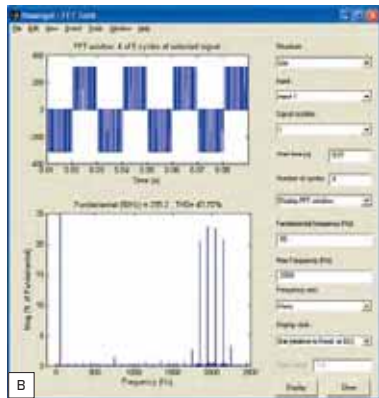
- **Structure** [структура] — позволяет выбрать один из параметров, установленных при настройке осциллографа **In** или **Um**, используемый в дальнейшем для построения амплитудного спектра;



а



б



в



г

Рис. 4. Окно настройки **Powergui: FFT Tools** для тока **In** (а) напряжения на нагрузке **Um** (в) и перечень значений рассчитанных параметров (б и г) относительно основной частоты

- **Input** — вход;
- **Signal number** — номер сигнала;
- **Start time** (s) [стартовое время] — начало интервала, в пределах которого будет расположен исследуемый сигнал;
- **Number of cycles** [число циклов — периодов] — длительность исследуемого сигнала, заданная в периодах;
- Меню:
 - **Display FFT window** — изображение сигнала с окном для спектрального анализа;
 - **Display entire signal** — изображение полного сигнала.
- Последующие строки:
 - **Fundamental frequency (Hz)** — основная частота (Гц);
 - **Max Frequency (Hz)** — максимальная частота спектра сигнала, используемая при анализе;
- **Frequency axis** — ось частот. Выбирается из списка **Hertz** (герцы) или **Harmonic order** (номер гармоники);
- **Display style** — вид изображения. Выбирается из списка:
 - **Bar (relative Fund. or DC)** — диаграмма (относительно основной частоты или постоянной составляющей);
 - **List (relative Fund. or DC)** — перечень (относительно основной частоты или постоянной составляющей);
 - **Bar (relative to specified base)** — диаграмма (относительно специальной базовой величины);
 - **List (relative to specified base)** — перечень (относительно специальной базовой величины).
 - **Base value** — базовая величина.

В рассматриваемом примере выполнены следующие настройки (рис. 4а): выбрана анализируемая величина **In** и входной сигнал 1; стартовое время — 0,01 (первый полупериод соответствует режиму пуска и исключен из рассмотрения); число циклов — 4 (всего их 5, из которых половина первого периода исключена); изображение FFT окна; основная частота 50 Гц; максимальная частота 2500 Гц; по оси частот откладываются Гц; выводится изображение диаграммы относительно основной частоты. После нажатия клавиши **Display** появляются изображения анализируемой части сигнала длительностью 4 периода и спектрограмма тока **In** (рис. 4а). Видно, что амплитуда основной гармоники с частотой 50 Гц составляет около 29,17 В. В то же время амплитуды высших гармоник не превышают 1% (0,3 В) от амплитуды основной гармоники. Наиболее интенсивные высшие гармоники находятся в области 2 кГц. Величина коэффициента гармоник, называемого **THD** — **Total Harmonic Distorsion**, в рассматриваемой области частот достигает 7%. На рис. 4б представлены численные значения шага дискретизации, числа шагов в периоде, амплитуда основной гармоники, **THD** и амплитуды гармоник — основной и высшей (из-за ограниченности размеров окна показано всего 5 гармоник).

В спектре напряжения **Um** (рис. 4в) амплитуда основной гармоники равняется 295 В, высшие гармоники с частотами около 2 кГц имеют амплитуды до 65 В (рис. 4г). У остальных гармоник амплитуды составляют менее 1%. Коэффициент гармоник этого сигнала достигает 43,7%.

Расчетный метод построения амплитудного спектра сигнала

Для расчета амплитудного спектра сигнала используем данные из приведенной выше модели. Чтобы получить численные значения анализируемых сигналов, необходимо в функциональную модель ввести дополнения, предоставляющие возможность записи в рабочее пространство сигналов в виде векторов. Эти дополнения представлены в функциональной схеме на рис. 5 и выражаются во введении дополнительных блоков для записи векторов с новыми идентификаторами, исключаяющими совпадение с имеющимися названиями. Для получения векторов тока нагрузки **I**, напряжения на нагрузке **U** и времени **t** введены три блока **To Workspace** (библиотека **Simulink**, раздел **Sinks**) и блок **Clock** (библиотека **Simulink**, раздел **Sources**) (рис. 5а). Источник времени **Clock** имеет одну настройку — прореживание **Decimation**. Оставим ее равной 1. У блоков записи в рабочее пространство **To Workspace** введем свои названия сигналов в строке **Variable name** — **I**, **U** и **t** соответственно (в пиктограммах появятся эти названия), затем произведем прореживание **Decimation** (равно 10), шаг дискретизации был ранее задан 0,00001 и в меню **Save format** (сохраняемый формат) выбираем **strout** (сохраняем).

Скорректированная модель с новым названием **Invert_W**, данным при сохранении, за-

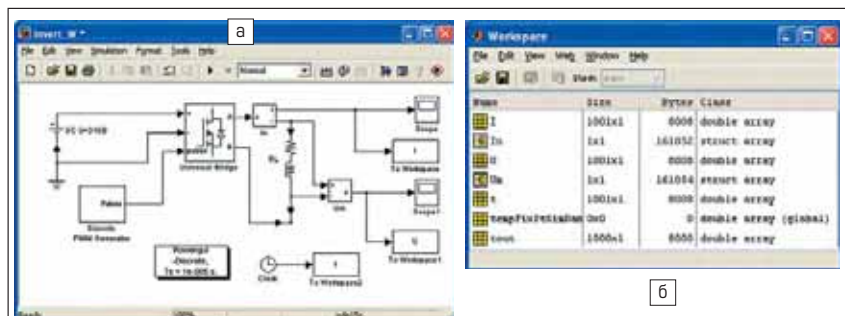


Рис. 5. Функциональная модель инвертора (а) с записью сигналов и перечень переменных в рабочем пространстве (б)

пускается на выполнение. Для проверки наличия указанных сигналов следует открыть рабочее пространство, что осуществляется в командном окне MATLAB в меню **View/Workspace**. Открывается окно, в котором приводится перечень переменных различного формата (рис. 5б). В частности, имеются три нужных вектора-столбца одинакового размера 1001×1 с именами **I**, **U**, **t**.

Для проверки записи сигналов набирается в текущей строке окна MATLAB команда

```
plot(t, I)
```

Она означает, что надо построить фигуру в виде графика с осями абсцисс **t** и ординат **I**. Длины обоих векторов должны быть одинаковыми. После выполнения (кнопка **Enter**) появится фигура, аналогичная осциллограмме (рис. 3а), но имеющая другое оформление и настройки (рис. 6). Читатель может посмотреть и второй сигнал **U** во временной области, набрав команду

```
plot(t, U).
```

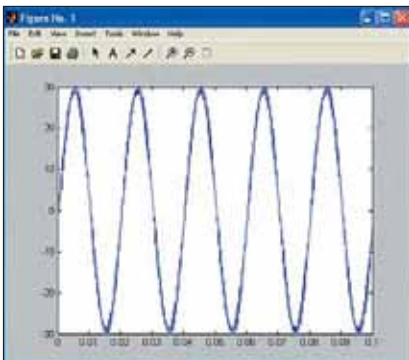


Рис. 6. Временная диаграмма тока нагрузки **I** инвертора, построенная по данным в рабочем пространстве

Для расчета Фурье-изображения сигнала (в качестве примера взят только ток **I**) вызывается отладчик программ. Для этого из командного окна через меню **File/New/M-file** открывается окно (его имя при открывании **Untitled**), предназначенное для набора и отладки команд. В этом окне (рис. 7а) набираются команды программы. В рассматриваемом примере они приведены с комментариями. Все комментарии записываются после знака **%** и не оказывают никакого влияния на выполнение программы. При выборе масштаба по оси частот необходимо учесть, что была произведена децимация в 10 раз. По этой причине число точек отсчетов надо задать в количестве 10001, то есть учесть десятикратное преувеличение. По оси ординат число точек отсчетов взято с учетом децимации, то есть **Nd**. Следует заметить, что построение спектра в MATLAB выполняется с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) и для его реализации число точек отсчета должно быть пропорционально 2^n . Лишние точки будут считаться нулевыми, как это происходит в рассматриваемом случае.

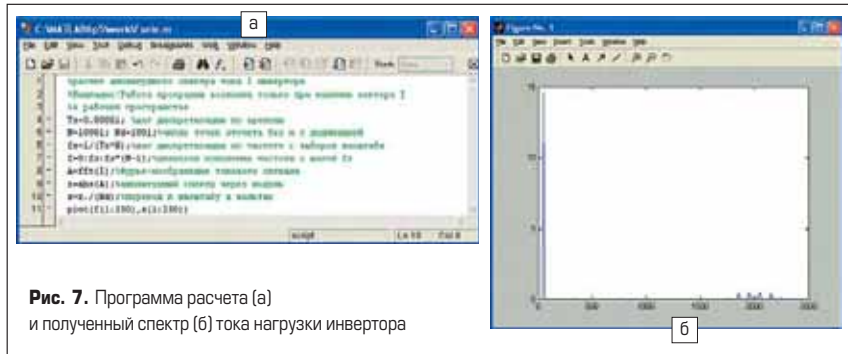


Рис. 7. Программа расчета (а) и полученный спектр (б) тока нагрузки инвертора

В программе (рис. 7а) имеются стандартные команды **fft** (получение Фурье-изображения сигнала **I** в комплексном виде) и **abs** — нахождение модуля от полученных в комплексном виде результатов преобразования. Прокомментировать по применению этих команд можно, набрав в окне MATLAB, например, команду **help fft**. При получении спектрограммы используется только часть полученных результатов, что задается подмножеством отсчетов в виде **t(1:250)**, **s(1:250)** и необходимо для увеличения масштаба по оси частот, но только при построении графика. После сохранения программы через меню **File/Save As...** под каким-либо именем, к примеру **Furie**, можно выполнить расчет.

Для запуска программы используется в окне отладчика меню **Debug/Save and Run** или **Debug/Run** (второй вариант реализуется, если нет необходимости сохранять внесенные в программу изменения). На рис. 7б приводится амплитудный спектр, полученный по результатам расчета. Видно, что амплитуда основной гармоники около 15 В, то есть в два раза меньше истинной амплитуды тока. Это соответствует методике расчета при БПФ. А вот сколько-нибудь значимые высшие гармоники имеются в районе частоты 2 кГц, как и на рис. 4а.

Получение передаточной функции и частотных характеристик

При проектировании устройств силовой электроники довольно часто возникает задача автоматизированного построения модели динамической системы с известной структурой. Чаще всего в качестве исходной информации задается принципиальная схема цепи, а модель представляет собой передаточную функцию. В MATLAB при построении передаточной функции используется модель системы в пространстве состояний, записываемая в виде уравнений переменных состояния, и есть возможность построения ее сразу же из схемы цепи. Правда в таком случае все коэффициенты получаются в численном виде, то есть представляют собой числа, а не символы.

Уравнения переменных состояния записываются с использованием матриц, что обеспечивает их компактность и удобство использования в программе MATLAB, которая построена на матричном исчислении. Для системы n -го порядка уравнения переменных состояния имеют вид

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = \mathbf{A} \times x(t) + \mathbf{B} \times u(t) \\ y(t) = \mathbf{C} \times x(t) + \mathbf{D} \times u(t), \end{cases} \quad (1)$$

В (1) первое уравнение — это дифференциальное уравнение состояния, а второе — уравнение выходной переменной; $x(t)$ — вектор-столбец переменных состояния; $u(t)$ — входной сигнал; $y(t)$ — выходной сигнал (реакция) системы; **A**, **B**, **C**, **D** — матрицы: **A** — матрица коэффициентов системы, в общем случае имеющая размерность $n \times n$ при n , равном числу переменных состояния; **B** — матрица входа, в которой число строк равно n , число столбцов соответствует числу входов системы; **C** — матрица выхода (число строк равно числу выходов, число столбцов равно n); **D** — матрица обхода (число строк равно числу выходов, число столбцов равно числу входов).

Рассмотрим функцию **power2sys**, позволяющую строить математическую модель в пространстве состояний электрической схемы, созданной в **SimPowerSystem** с использованием блоков библиотеки **Simulink**.

Назначение:

Функция **power2sys** рассчитывает элементы матриц **A**, **B**, **C**, **D** уравнений пространства состояния, описывающих модель (1). Она вызывается автоматически из **Simulink** при начале расчета модели или запускается на выполнение непосредственно из командного окна MATLAB.

Синтаксис:

```
power2sys('sys', 'structure')
```

Эта команда создает структуру для модели с названием **sys**. Другая команда

```
power2sys('sys', 'ss')
```

дает информацию о численных значениях элементов матриц **A**, **B**, **C**, **D**.

Подробности о способах использования функции **power2sys** можно найти в руководстве пользователя для **SimPowerSystem**. Отметим лишь, что аббревиатура **ss** означает **state space** (пространство состояний). Для демонстрации возможности этой функции рассмотрим сглаживающий LC-фильтр преобразователя, состоящий из двух ячеек, соединенных последовательно друг с другом. На выходе фильтра подключена нагрузка **R** (рис. 8).

Получение передаточной функции подобного фильтра в аналитическом виде традици-

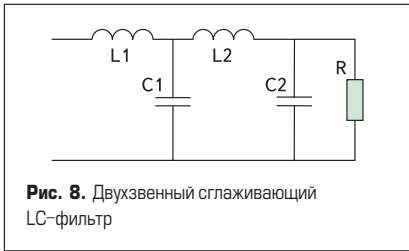
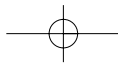


Рис. 8. Двухзвенный сглаживающий LC-фильтр

онным методом — довольно сложная задача. Покажем возможность относительно простого способа определения передаточной функции с помощью рассматриваемой функции power2sys для LC-фильтра.

Пример 2. Для двух фильтров — однозвенного LC-фильтра с параметрами L1 = 15 мГн, C1 = 2 мкФ и R = 8 Ом и затем для двухзвенного LC-фильтра с параметрами L1 = 15 мГн, C1 = 2 мкФ, L2 = 3 мГн, C2 = 15 мкФ, R = 8 Ом получить передаточные функции.

Функциональные модели этих фильтров представлены на рис. 9а (модель LC_1_Filter) и рис. 9б (модель LC_2_Filter), а информация о блоках приведена в таблице 2.

После настройки модель LC_1_Filter запускается на выполнение. Итог работы — временная диаграмма входного и выходного сигналов (рис. 10а). Затем в командном окне MATLAB набирается следующая команда:

```
>> H1=power2sys('LC_1_Filter','ss')
```

Все четыре необходимые матрицы, обозначенные строчными буквами, рассчитываются с указанием параметров, к которым относится каждый элемент матрицы (над строками и слева от столбцов), в виде

```
a =
      Uc_C1=2e-6   II_L1=0.015
      Uc_C1=2e-6   -6.25e+004   5e+005
      II_L1=0.015   -1000      0
b =
      U_C Controlled
      Uc_C1=2e-6   0
      II_L1=0.015  1000
c =
      U_C Controlled
      U_Voltage Me  Uc_C1=2e-6   II_L1=0.015
d =
      U_C Controlled
      U_Voltage Me  0
Continuous-time model.
```

Итак, переменные состояния анализируемой схемы — ток I индуктивности L1 и на-

Таблица 2

| Библиотека | Блок | Параметры |
|------------------------------------|--|--|
| Simulink\Sources | Signal Generator — генератор сигнала | Wave form — sin Amplitude — 1 V Frequency — 1000 Hz |
| SimPowerSystems\Electrical Sources | Controlled Voltage Source — управляемый источник напряжения | Source Type — AC |
| SimPowerSystems\Elements | Series RLC Branch — последовательно соединенные RLC-элементы | Resistance R Inductance L1 Capacitance C1 Inductance L2 Capacitance C2 |
| SimPowerSystems\Measurements | Voltage Measurement — измеритель напряжения | — |
| Simulink\Sinks | Scope — осциллограф | — |
| SimPowerSystems\Connectors | L-connector — L-соединитель | 3 штуки |

пряжение Uс на конденсаторе C1, а выходное напряжение U_Voltage Measurement равно Uс_C1 при входном напряжении U_Controlled. В самом низу указано, что эта модель выполнена для непрерывного сигнала Continuous-time model. Передаточная функция находится с помощью команды tf, которая преобразует модель H1 (ss-модель) в привычное по записи отношение двух полиномов от переменной s, представляющей собой комплексную частоту в преобразовании Лапласа. Набирается команда с указанием в круглых скобках идентификатора передаточной функции ss-модели, а именно:

```
>> W1=tf(H1)
```

После выполнения команды получается передаточная функция фильтра второго порядка

```
Transfer function from input «U_Controlled Voltage Source» to output «U_Voltage Measurement»:
5e008
-----
s^2 + 6.25e004 s + 5e008
```

Для модели двухзвенного фильтра, временная диаграмма входного и выходного сигнала которой представлена на рис. 10б, наши действия аналогичны и дают следующие результаты:

```
>> H2=power2sys('LC_2_Filter','ss')
a =
      Uc_C1=2e-6   Uc_C2=15e-6   II_L1=0.015   II_L2=3e-3
      Uc_C1=2e-6   0               0             5e+005   -5e+005
      Uc_C2=15e-6  0             -6667        0         6.667e+004
      II_L1=0.015  -1000        0             0         0
      II_L2=3e-3   333.3       -333.3       0         0
```

```
b =
      U_C Controlled
      Uc_C1=2e-6   0
      Uc_C2=15e-6  0
      II_L1=0.015  1000
      II_L2=3e-3   0
c =
      Uc_C1=2e-6   Uc_C2=15e-6   II_L1=0.015   II_L2=3e-3
      U_Voltage Me  0             1             0             0
d =
      U_C Controlled
      U_Voltage Me  0
Continuous-time model.
```

Для получения передаточной функции набирается команда

```
>> W2=tf(H2)
```

Передаточная функция фильтра с теми же напряжениями на входе и выходе уже существенно сложнее, так как фильтр имеет четвертый порядок. Переменных состояния также четыре — токи в двух индуктивностях и напряжения на двух конденсаторах.

```
Transfer function from input «U_Controlled Voltage Source» to output «U_Voltage Measurement»:
1.111e016
-----
s^4 + 6667 s^3 + 6.889e008 s^2 + 4.444e012 s + 1.111e016
```

По передаточным функциям можно получить графическое изображение диаграмм Боде (в отечественной литературе это логарифмические амплитудные и фазовые частотные характеристики — ЛАХ и ЛФХ), для чего в командном окне MATLAB набирается команда

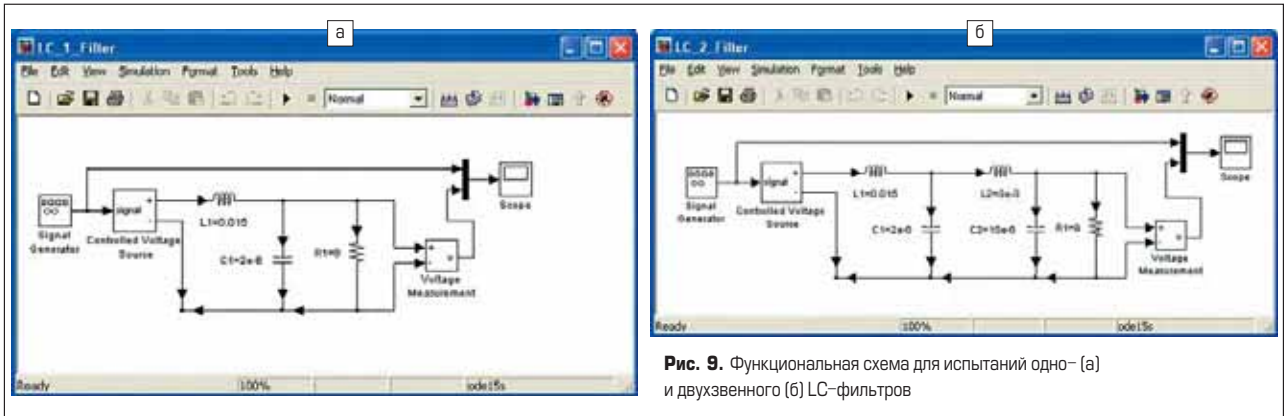
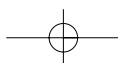


Рис. 9. Функциональная схема для испытаний одно- (а) и двухзвенного (б) LC-фильтров



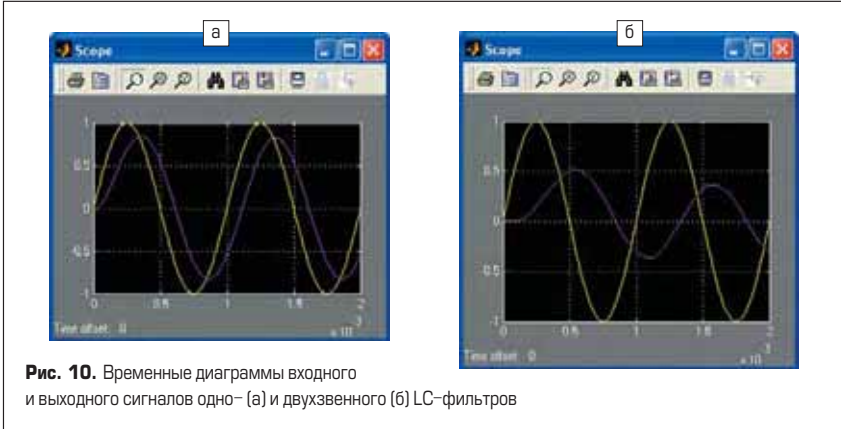
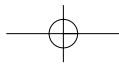


Рис. 10. Временные диаграммы входного и выходного сигналов одно- (а) и двухзвенного (б) LC-фильтров

```
>> bode(W1)
```

После выполнения команды получаем ЛАХ и ЛФХ (рис. 11а). Видно, что коэффициент передачи фильтра на низкой частоте равен 0 дБ и падает практически до -100 дБ в области частот, превышающих 1 МГц. Фазовый сдвиг при этом достигает -180°.

Для получения амплитудно- и фазочастотной характеристик системы, имеющей извест-

ную передаточную функцию, используется другая команда **freqs** с другим аргументом, указанным в круглых скобках и задаваемым двумя векторами в квадратных скобках через запятую. Первый вектор представляет собой коэффициенты числителя, начиная с коэффициента у переменной *s* в старшей степени, а второй — коэффициенты знаменателя в той же последовательности. В случае фильтра второго порядка эта команда имеет следующее написание:

```
>> freqs([5e008],[1 6.25e004 5e008])
```

В результате для указанного фильтра построены АЧХ и ФЧХ (рис. 11б), имеющие аналогичный вид, но на первом графике по оси ординат указаны значения амплитуды (magnitude) в абсолютных единицах при логарифмическом масштабе по оси абсцисс (частот) и автоматически нанесена сетка на оба графика.

Для фильтра четвертого порядка после исполнения обеих указанных команд

```
>> bode(W2)
```

```
>> freqs([1.111e016],[1 6667 6.889e008 4.444e012 1.111e016])
```

получены диаграмма Бодэ и АФЧХ (рис. 11в, г). Особенность диаграммы Бодэ состоит в том, что фазовый сдвиг резко (в виде перепада) изменяется от -180° до -360° из-за выбранного масштаба по оси частот. Если бы проводился анализ для интервала частот в окрестности точки резкого изменения фазового сдвига, то изменение указанного параметра было бы плавным. В то же время на АФЧХ диапазон изменения фазового сдвига изображается в пределах от 0 до -180°, хотя он принимает значения, превышающие эту величину.

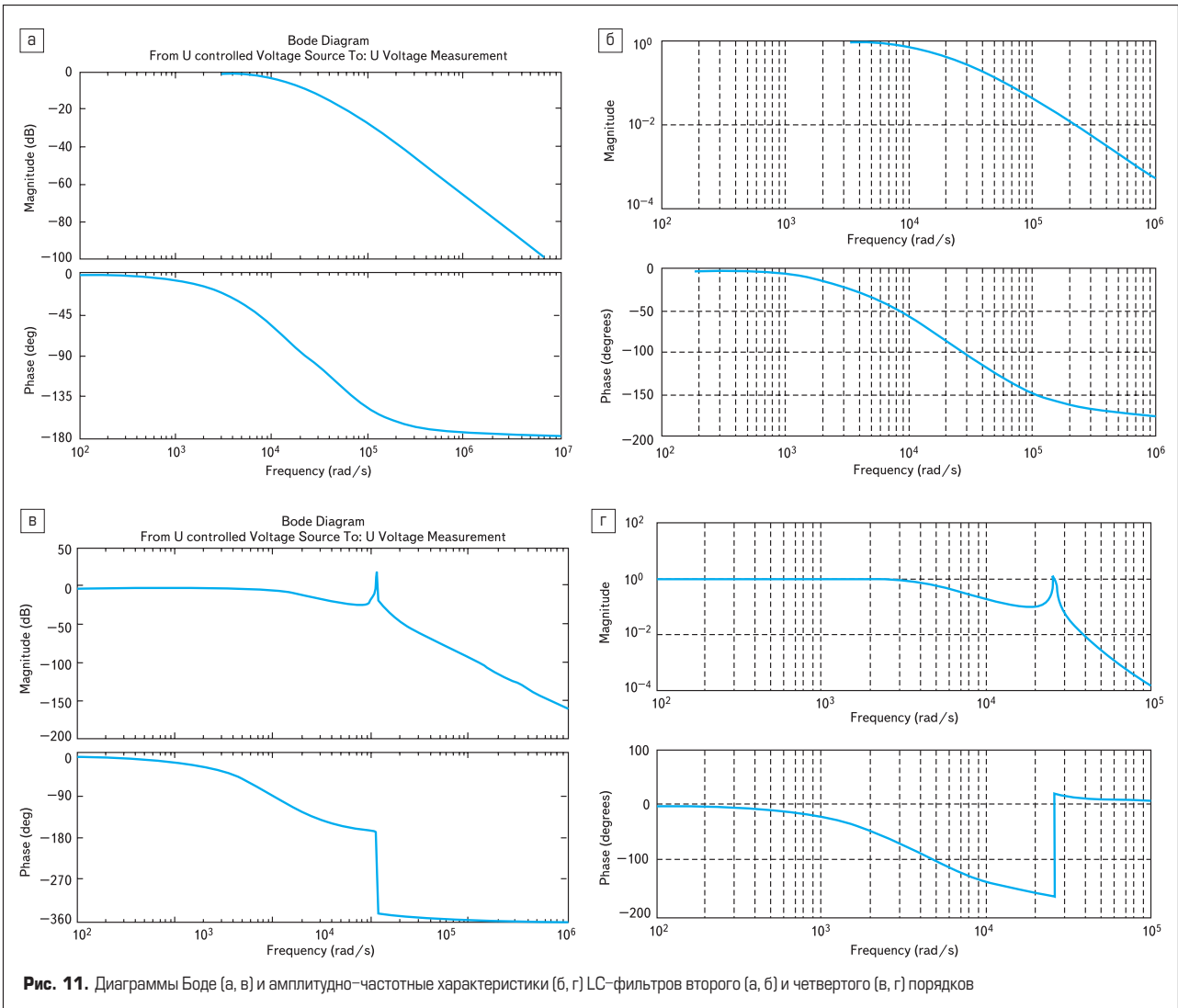
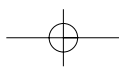
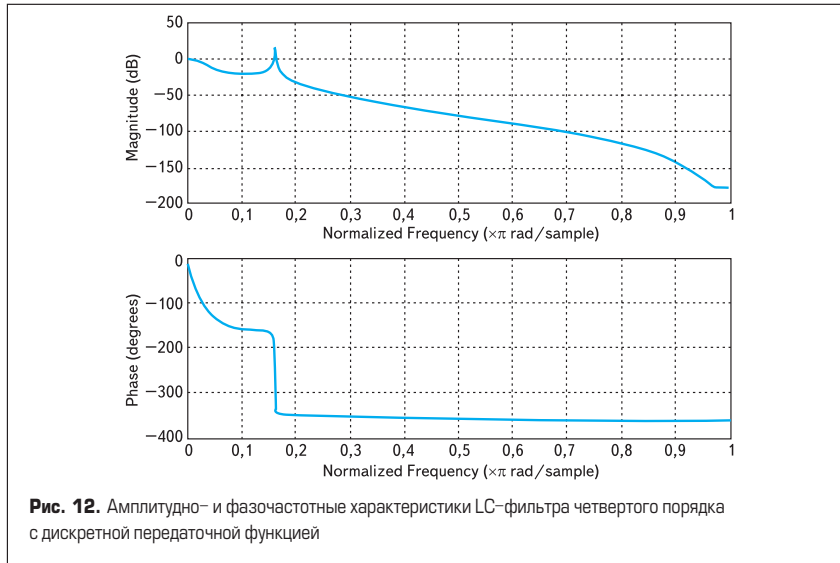
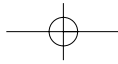


Рис. 11. Диаграммы Бодэ (а, в) и амплитудно-частотные характеристики (б, г) LC-фильтров второго (а, б) и четвертого (в, г) порядков





По этой причине следует быть внимательным при определении данного параметра, так как итоговый сдвиг после частоты 10 кГц в рассматриваемом случае определяется добавлением текущего значения фазового сдвига к величине -180° .

Таким образом, получена непрерывная модель объекта, от которой перейдем к дискретно-непрерывной модели. Для реализации перехода проще всего использовать функцию MATLAB вида **c2d**. Форма записи

```
WZ=c2d(sys,Ts,'met')
```

Содержит название передаточной функции **sys**, период дискретизации **Ts** и метод дискретизации **met**. Информацию о методах можно получить с помощью команды

```
help c2d.
```

В качестве примера используем метод дискретизации с помощью билинейного преобразования **tustin**. Применим этот метод для преобразования передаточной функции фильтра четвертого порядка. Для этого в рабочем пространстве необходимо иметь данные о передаточной функции, которая выше была обозначена как **W2**. Команда по преобразованию имеет следующую форму записи:

```
>> WZ2=c2d(W2,2e-5,'tustin')
```

После выполнения команды возвращается информация по обозначениям входного и выходного сигнала, о дискретной передаточной функции с указанием периода дискретизации **Sampling time**

```
Transfer function from input «U_Controlled Voltage Source» to output «U_Voltage Measurement»:
9.746e-005 z^4 + 0.0003898 z^3 + 0.0005847 z^2 + 0.0003898 z + 9.746e-005
-----
z^4 - 3.617 z^3 + 5.142 z^2 - 3.399 z + 0.8753
Sampling time: 2e-005
```

Для построения АФЧХ по полученной дискретной передаточной функции можно при-

менить функцию **freqz**, в качестве аргумента которой используются векторы коэффициентов числителя и коэффициентов знаменателя, а именно:

```
>> freqz([9.746e-005 0.0003898 0.0005847 0.0003898 9.746e-005],[1 - 3.617 5.142 -3.399 0.8753])
```

Полученные АФЧХ приведены на рис. 12. Видно, что имеется резонансная частота, составляющая около 0,17 нормированной частоты $fs/2 = 0,5/Ts$. При значении этой частоты, приближающейся к 1, амплитуда снижается на 180 дБ. Фазовый сдвиг имеет резкий спад в районе резонансной частоты от -180° до -360° , а затем остается практически неизменным.

Получение частотных характеристик с помощью графического интерфейса **ltview**

Графический интерфейс пользователя **ltview** (интерактивный обозреватель) предназначен для просмотра временных и частотных характеристик модели. Перед запуском этого интерфейса необходимо подготовить исходные данные. Подготовка состоит в получении выражения для передаточной функции в одном из трех видов — **ss** (пространство состояний), **tf** (передаточная функция в виде полиномов числителя и знаменателя) или **zpk** (передаточная функция с указанием нулей, полюсов и коэффициента передачи, записанная в виде множителей в числителе и в знаменателе). Хотя бы одно из этих выражений под своим именем (идентификатором) должно находиться в рабочем пространстве MATLAB. Для запуска интерфейса в командном окне MATLAB набирается функция **ltview**. После исполнения появляется графическое окно или интерактивный обозреватель (рис. 13а), в котором могут быть вызваны основные команды для анализа во временной или частотной областях объектов, представленных передаточной функцией.

Предположим, после тех же действий, что были изложены выше, получена передаточ-

ная функция двухзвенного фильтра **H2** в пространстве состояний **ss**, и она загружена в рабочее пространство. Далее необходимо в окне **LTI View** последовательно вызвать меню **File/Import**. В появившемся новом окне **Import System Data** имеется перечень передаточных функций **System in Workspace**. В рассматриваемом перечне в нашем случае имеется только одна передаточная функция **H2** (рис. 13б). Активируем строку с этой передаточной функцией ЛКМ и затем нажмем кнопку ОК. В окне **LTI View** появится переходный процесс в анализируемой цепи при подаче единичного ступенчатого воздействия (рис. 13в). Поскольку надо получить характеристику рассматриваемой цепи в частотной области, то в окне **LTI View** с помощью меню **Edit/Plot Configurations** вызывается окно **Plot Configurations** (рис. 13г). В последнем окне включается конфигурация 1 (один рисунок на все окно) и затем в меню **Response type** выбирается диаграмма Боде. После того как нажата кнопка ОК, в окне **LTI View** появится эта диаграмма (рис. 13д).

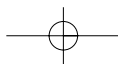
Также можно получить различные конфигурации построения рисунков и следующие основные характеристики анализируемой цепи:

- **Step** — реакция на единичный скачок;
- **Impulse** — импульсная характеристика;
- **Bode** — диаграмма Боде;
- **Bode Magnitude** — амплитудная диаграмма Боде;
- **Niquist** — диаграмма Найквиста (годограф);
- **Nicols** — годограф Николса;
- **Singular Value** — зависимость сингулярных чисел комплексного коэффициента передачи системы от частоты;
- **Pole/Zero** — карта нулей и полюсов.

На рис. 13е в качестве примера приведен годограф Найквиста для анализируемой цепи. Он строится в системе координат, соответствующей комплексной частоты s , а именно: по оси абсцисс откладывается действительная часть передаточной функции при $s = j\omega$, а по оси ординат — мнимая часть. Для получения годографа осуществляется изменение частоты ω от 0 до ∞ .

Подведем итоги урока 5.

1. Для анализа спектрального состава токов и напряжений в устройствах силовой электроники можно воспользоваться графическим интерфейсом пользователя **Powergui**. Для этого следует произвести дополнительную подстройку осциллографа, загрузить анализируемые сигналы в рабочее пространство и выполнить гармонический анализ этих сигналов в окне **Powergui: FFT Tools** с получением амплитудного спектра и оценки коэффициента гармоник.
2. Расчетный метод частотного анализа состоит в создании программы расчета, набираемой в окне отладчика программ, и использовании стандартных функций для вычисления модуля спектра исследуемого сигнала с помощью быстрого преобразования Фурье.
3. Важной положительной особенностью MATLAB является возможность с помощью функции **power2sys** получить передаточную функцию объекта непосредственно по его функциональной схеме.



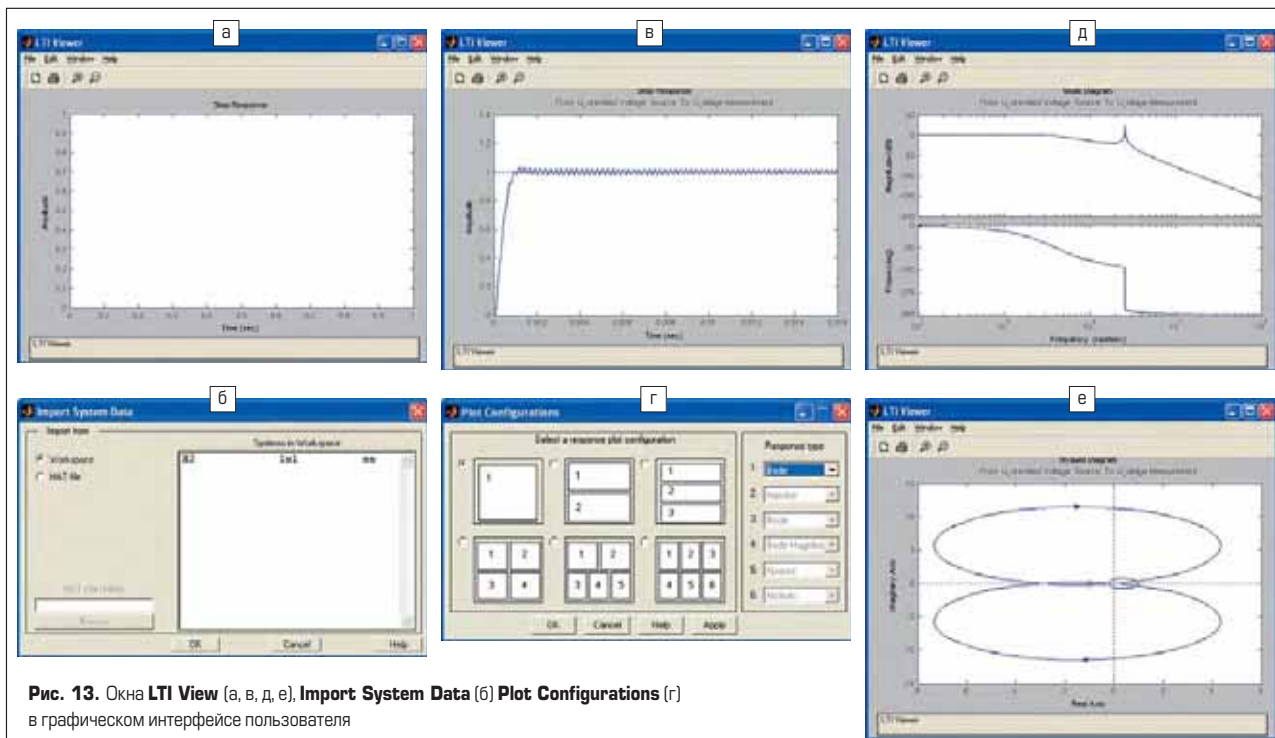
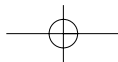


Рис. 13. Окна LTI View (а, в, д, е), Import System Data (б) Plot Configurations (г) в графическом интерфейсе пользователя

4. По передаточной функции системы строятся логарифмические частотные (диаграммы Боде), а также амплитудно-фазочастотные характеристики АЧХ и ФЧХ.
5. С помощью функции `c2d` осуществляется переход от передаточных функций непре-

рывных систем к передаточным функциям дискретных систем.

6. За счет применения графического интерфейса пользователя `Itview` наиболее просто по передаточным функциям системы строятся ее различные частотные характеристики.

Литература

1. Герман-Галкин С. Г. Спектральный анализ процессов силовых полупроводниковых преобразователей в пакете MATLAB (R13) // Exponenta PRO. Математика в приложениях. 2003. № 2. С. 80–82.

