

Школа MATLAB

Урок 4. Анализ динамических свойств устройств силовой электроники во временной области

Цель этого урока — изучение средств виртуального моделирования, используемых для анализа переходных процессов и оценки динамических параметров устройств силовой электроники при использовании блоков библиотек Simulink и SimPowerSystems. Для усвоения материала этого раздела необходимо ознакомиться с материалом уроков 1, 2 и 3.

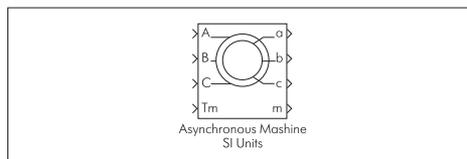
**Владимир Худяков,
Д. Т. Н.**

kaf21@aanet.ru

Моделирование процессов разгона и торможения электродвигателя

Начнем рассмотрение динамических процессов с построения виртуальной модели асинхронного двигателя (АД) с полупроводниковыми ключевыми элементами, позволяющей анализировать процесс разгона при подаче фазных напряжений на обмотку статора, а затем и процесс торможения АД при отключении этой обмотки. В качестве ключевых элементов для коммутации напряжений применяются идеальные ключи **Ideal Switch**.

Рассмотрим блоки, используемые в примере с АД. **Асинхронная машина (Asynchronous Machine)**



Назначение: блок предназначен для моделирования асинхронной электрической машины в двигательном или генераторном режимах, каждый из которых определяется знаком электромагнитного момента.

Порты модели A, B и C — выходы статорной обмотки машины.

Порты a, b и c — выходы обмотки ротора.

Порт T_m предназначен для получения момента сопротивления движению. На выходе порта *t* формируется векторный сигнал, состоящий из 21 элемента: токов, потоков и напряжений ротора и статора в неподвижной и вращающейся системах координат, электромагнитного момента, скорости вращения вала, а также его углового положения.

Для удобства извлечения переменных машины из вектора в библиотеке **SimPowerSystems** предусмотрен блок **Machines Measurement Demux**. Для асинхронного двигателя построены модель электрической части (уравнения четвертого порядка в пространстве состояний) и модель механической части (уравнения второго порядка). Все электрические параметры машины приведены к обмотке

статора. Исходные уравнения электрической части машины записаны для двухфазной (dq-оси) системы координат.

Параметры блока (окно для настройки параметров блока вызывается двойным щелчком левой кнопки мыши — ЛКМ на пиктограмме блока) (рис. 1):

- **Rotor typ [тип ротора]** выбирается из списка:
 - Squirrel-Cage — короткозамкнутый ротор типа «беличья клетка»;
 - Wound — фазный ротор.
- **Reference frame [система координат]** выбирается из списка:
 - Rotor — неподвижная относительно ротора;
 - Stationary — неподвижная относительно статора;
 - Synchronous — вращающаяся вместе с полем.
- **Nom. power, L-L volt. and frequency [Pn(VA), Un(V), fn(Hz)]** — номинальная мощность Pn (ВА), действующее линейное напряжение Un (В) и номинальная частота fn (Гц).
- **Stator [Rs(Ohm) Ls(H)]** — сопротивление Rs (Ом) и индуктивность Ls (Гн) статора.
- **Rotor [Rr(Ohm) Lr'(H)]** — сопротивление Rs (Ом) и индуктивность Ls (Гн) ротора.
- **Mutual inductance Lm(H)** — взаимная индуктивность (Гн).
- **Inertia, friction factor and pairs of poles [J(kg·m²) F(N·m·s) p]** — момент инерции J(кг·м²), коэффициент трения F(Н·м·с) и число пар полюсов p.
- **Initial conditions [s th(deg) isa, isb, isc(A) pha, phB, phC(deg)]** — начальные условия.

Параметр задается в виде вектора, каждый элемент которого имеет следующие значения:

- *s* — скольжение;
- *th* — фаза (град.);
- *isa, isb, isc* — начальные значения токов статора (А);
- *pha, phB, phC* — начальные фазы токов статора (град.).

Начальные условия машины вычисляются при необходимости с помощью блока **Powergui** (см. ниже).

Блок измерения переменных электрической машины Machines Measurement Demux

Назначение: блок предназначен для извлечения переменных состояния из вектора измеряемых переменных электрической машины. Блок работает

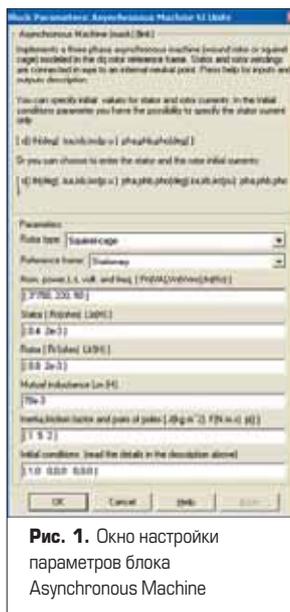
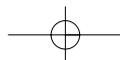
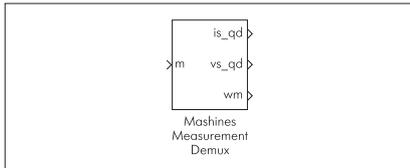
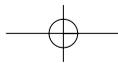


Рис. 1. Окно настройки параметров блока Asynchronous Machine





совместно с моделями синхронных и асинхронных машин.

Окно задания параметров представлено на рис. 2.

Параметры блока:

- *Machine type* — тип машины. Выбирается из списка:
 - *Simplified synchronous* — упрощенная синхронная машина;
 - *Synchronous* — синхронная машина;
 - *Asynchronous* — асинхронная машина;
 - *Permanent magnet synchronous* — синхронная машина с постоянными магнитами.

В зависимости от выбранного типа машины в окне параметров будет отображаться разный набор выходных переменных машины. Ниже приведены доступные для измерения переменные асинхронной машины.

- *Rotor currents [ira irb irc]* — токи обмотки ротора.
- *Rotor currents [ir_q ir_d]* — проекции токов ротора на оси q и d.
- *Rotor fluxes [phir_q phir_d]* — проекции потоков ротора на оси q и d.
- *Rotor voltages [vr_q vr_d]* — проекции напряжений статора на оси q и d.
- *Stator currents [ia, ib, ic] A* — токи статора.
- *Stator currents [is_q is_d] A* — проекции токов статора на оси q и d.
- *Stator fluxes [phis_q phis_d]* — проекции потоков статора на оси q и d.
- *Stator voltages [vs_q vs_d] V* — проекции напряжений статора на оси q и d.
- *Rotor speed [wm] rad/s* — скорость ротора.
- *Electromagnetic torque [Te] N.m* — электромагнитный момент.
- *Rotor angle [thetam] rad* — угол поворота ротора.

Для извлечения требуемой переменной из вектора измеряемых переменных ее необходимо отметить флажком.

Пример 1. Выполнить модель для анализа процессов разгона и торможения асинхрон-

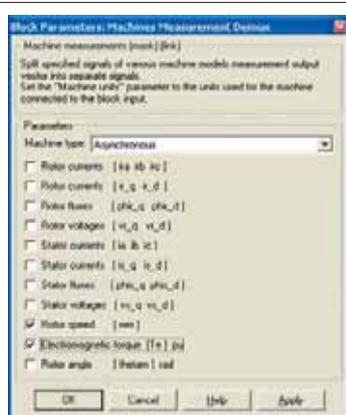


Рис. 2. Окно настройки параметров блока Machines Measurement Demux

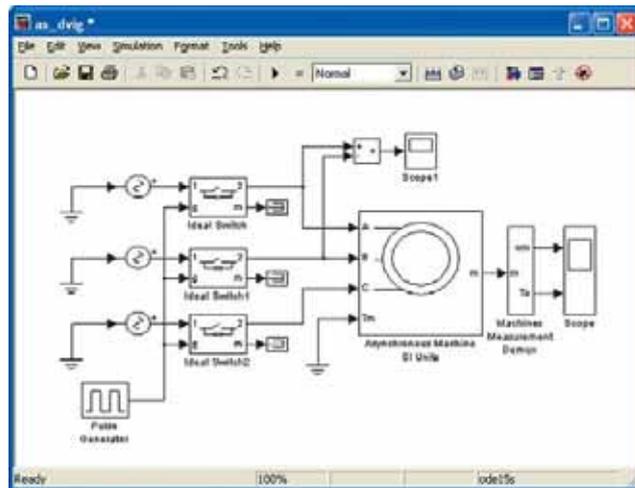


Рис. 3. Функциональная схема асинхронного двигателя с элементами коммутации и измерений

ного двигателя с короткозамкнутым ротором и неподвижной относительно статора системой координат. Используются материалы из книги [1].

Исходные данные для модели: питающее переменное напряжение на каждом источнике $220\sqrt{2}$ В с частотой переменного тока 50 Гц и фазовым сдвигом -120° , 0° и 120° . У двигателя мощность составляет 3-750 VA, а остальные его параметры указаны в окне настройки (рис. 1).

Функциональная схема АД с ключевыми элементами представлена на рис. 3. Она содержит следующие блоки из библиотеки SimPowerSystems: источники переменного напряжения AC Voltage Source (раздел Electrical Sources), асинхронный двигатель Asynchronous Machine SI Units (раздел Machines), блок Machines Measurement Demux (раздел Measurements), идеальный ключ Ideal Switch (раздел Power Electronics), заземление Ground (раздел Connectors). Информационные порты m идеальных ключей заглушены, поскольку они не нужны (подключен Terminator из раздела Sinks библиотеки Simulink) (рис. 3).

Для построения схемы вызываются два окна: окно обозревателя библиотеки Simulink Library Browser кнопкой и окно модели через меню File/New/Model. Располагаются окна рядом на рабочем столе. В левой части окна обозревателя следует закрыть дерево Simulink, открыть дерево SimPowerSystems и активировать строку дерева Electrical Sources (источники электрической энергии), а затем поочередно все перечисленные выше разделы. Схема собирается по технологии «drag-and-drop». Для управления ключами используется генератор прямоугольных импульсов Pulse Generator, подключенный к управляющим электродам g идеальных ключей.

Настройка схемы заключается в установке уровня напряжений источников, частоты и фазовых сдвигов, а также в выборе параметров АД в соответствии с рис. 1. У генератора Pulse Generator задается амплитуда 1 В, длительности периода 3 с и длительности импульса величиной 50% от длительности

периода. Измерения осуществляются с помощью осциллографов Scope (раздел Sinks библиотеки Simulink), первый из которых подключен к порту m блока Machines Measurement Demux, второй — к фазам A и B асинхронного двигателя через измеритель напряжения Voltage Measurement из раздела Measurements (измерительные и контрольные устройства). Все настройки осциллографов были подробно рассмотрены в материалах предыдущих уроков. Модельное время Stop time, равное периоду импульсного сигнала 3 с, и максимальный шаг дискретизации Max step size (величина auto) устанавливаются в меню Simulation/Simulation parameters

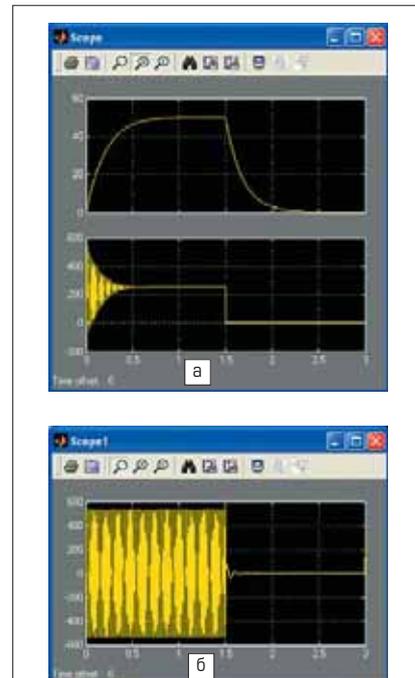
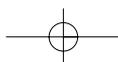


Рис. 4. Временные диаграммы изменения скорости ротора Rotor speed [wm], электромагнитного момента Electromagnetic torque [Te] (а) и межфазного напряжения на обмотке (б) асинхронного двигателя



окна модели. Результаты моделирования в виде временных диаграмм представлены на рис. 4. Видно, что в пределах 1,5 с двигатель разгоняется, а затем тормозится. Скорость ротора АД при этом нарастает и спадает по экспоненциальному закону.

Анализ динамических свойств преобразователя на основе дифференциальной модели

Дифференциальные модели основываются на однородных линейных дифференциальных уравнениях с постоянными коэффициентами. Пусть имеется одноконтурный непосредственный преобразователь с выходным

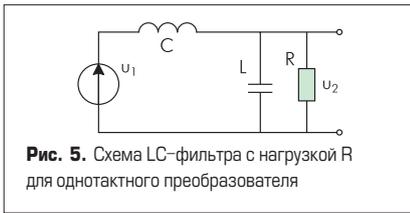


Рис. 5. Схема LC-фильтра с нагрузкой R для одноконтурного преобразователя

сглаживающим LC-фильтром, выполненным по Г-образной схеме (рис. 5). Входное напряжение u_1 представляет собой прямоугольные импульсы с заданным коэффициентом заполнения. У выходного напряжения u_2 после фильтрации имеется постоянная составляющая с малыми пульсациями.

Дифференциальное уравнение второго порядка, связывающее напряжения u_1 и u_2 без учета импульсного характера первого напряжения, можно записать в следующем виде:

$$\frac{d^2 u_2}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{du_2}{dt} + \frac{1}{LC} u_2 = \frac{1}{LC} u_1$$

или

$$\frac{d^2 u_2}{dt^2} = -\frac{1}{RC} \frac{du_2}{dt} - \frac{1}{LC} u_2 + \frac{1}{LC} u_1 \quad (1)$$

В результате решения дифференциального уравнения (1) необходимо получить u_2 как функцию времени. Для составления структурной схемы решения применим метод понижения порядка производной, реализация которого осуществляется следующим образом.

1. Предположим, в точке А значение второй производной d^2u_2/dt^2 известно в любой момент времени (рис. 6а). В точке В с помощью интегрирующего звена и с учетом начальных условий определяется значение первой производной du_2/dt . За счет еще одного интегратора в точке С получается значение искомой функции u_2 .
2. Теперь обратим внимание на правую часть уравнения (1), представляющую собой сумму трех функций времени du_2/dt , u_2 и u_1 , входящих с постоянными коэффициентами. Функция u_1 — возмущающее воздействие, известное по условию задачи. Допустим, что известны функции u_2 в точке С₁ и du_2/dt в точке В₁ (рис. 6б). Находятся их сумма с коэффициентами, соответствующими правой части (1), и получается вторая производная d^2u_2/dt^2 . В результате на выходе сумматора в точке А₁ определяется величина d^2u_2/dt^2 , известная в любой момент времени.
3. Уравнение (1), отражающее сущность моделируемого фильтра, должно выполняться в каждый момент времени t. Для реализации этого требования следует замкнуть выходы схемы, показанные на рис. 6а и 6б. При этом точки А и А₁, В и В₁, С и С₁ объединяются в пары, что отражает рис. 6в. При необходимости задаются начальные условия, определяющие единственность решения дифференциального уравнения (1). Инструментарий Simulink позволяет моделировать и исследовать поведение устройств силовой электроники, описываемых дифференциальными уравнениями с линейными или нелинейными коэффициентами,

имеющими постоянные или переменные значения. Единственное требование состоит в том, что дифференциальные уравнения должны быть представимы в виде структурной схемы, подобно указанной на рис. 6.

Пример 2. Построить модель для анализа процессов в LC-сглаживающем фильтре.

Исходные данные для модели: входное импульсное напряжение с амплитудой 10 В, частотой 100 кГц и коэффициентом заполнения импульсов 0,5. Сопротивление нагрузки 10 Ом, емкость конденсатора фильтра 20 мкФ и индуктивность дросселя 0,5 мГн.

На рис. 7а представлена модель для решения дифференциального уравнения второго порядка, описывающего связь входного u_1 и выходного u_2 напряжений. Состав блоков, входящих в схему, отражает таблица 1, причем в графе «Параметры» приведены только те параметры, которые изменяются при настройке.

В рассматриваемой модели нами впервые используется блок интегрирования входного сигнала — **Integrator** (табл. 1). Дадим краткие сведения по некоторым его настройкам в окне задания параметров.

- **External reset** (внешний сброс). Выбирается сигнал для сброса интегратора до начального значения. Выбирается из списка:
 - none — нет (сброс не выполняется);
 - rising — нарастающий сигнал (фронт сигнала);
 - falling — спадающий сигнал (срез сигнала);
 - either — нарастающий или спадающий сигнал;
 - level — ненулевой сигнал (сброс осуществляется при сигнале на входе, не равном 0).

Таблица 1

Библиотека	Блок	Параметры
Simulink\Sources	Pulse Generator — генератор прямоугольных импульсов	Amplitude [V] — 10, Period [s] — 0.00001, Pulse Width [%] — 50
Simulink\Math Operations	Gain — усилитель Gain1 — усилитель 1 Gain2 — усилитель 2	Gain — 10 ³ Gain1 — 10 ³ Gain2 — 2×10 ³
Simulink\Math Operations	Sum — сумматор	List of signs — +-
Simulink\Continuous	Integrator — интегратор	External reset — none Initial condition source — internal Initial condition — 0
Simulink\Sinks	Scope — осциллограф	—

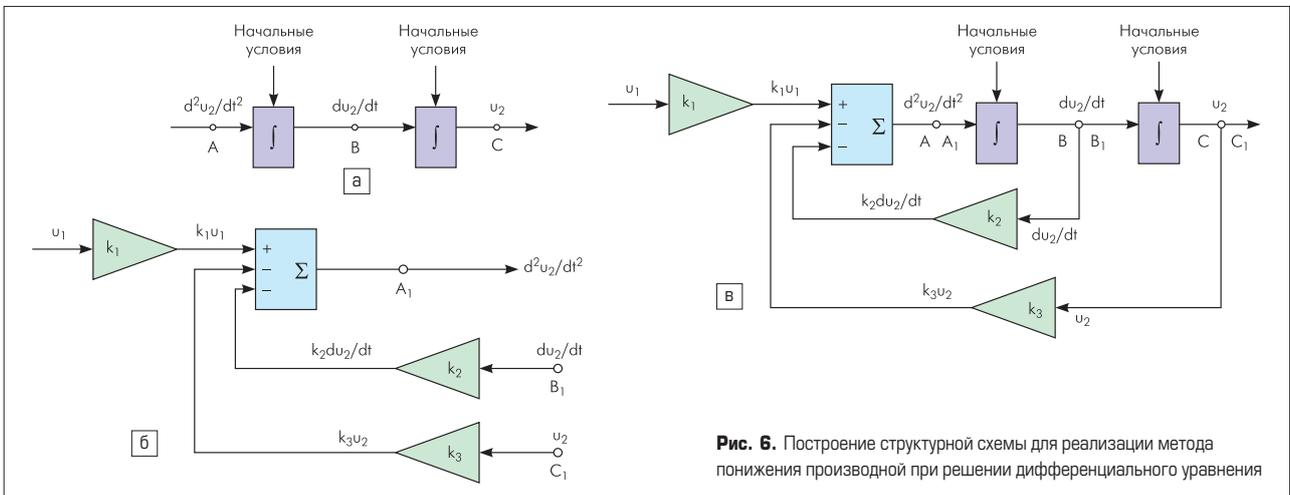


Рис. 6. Построение структурной схемы для реализации метода понижения производной при решении дифференциального уравнения

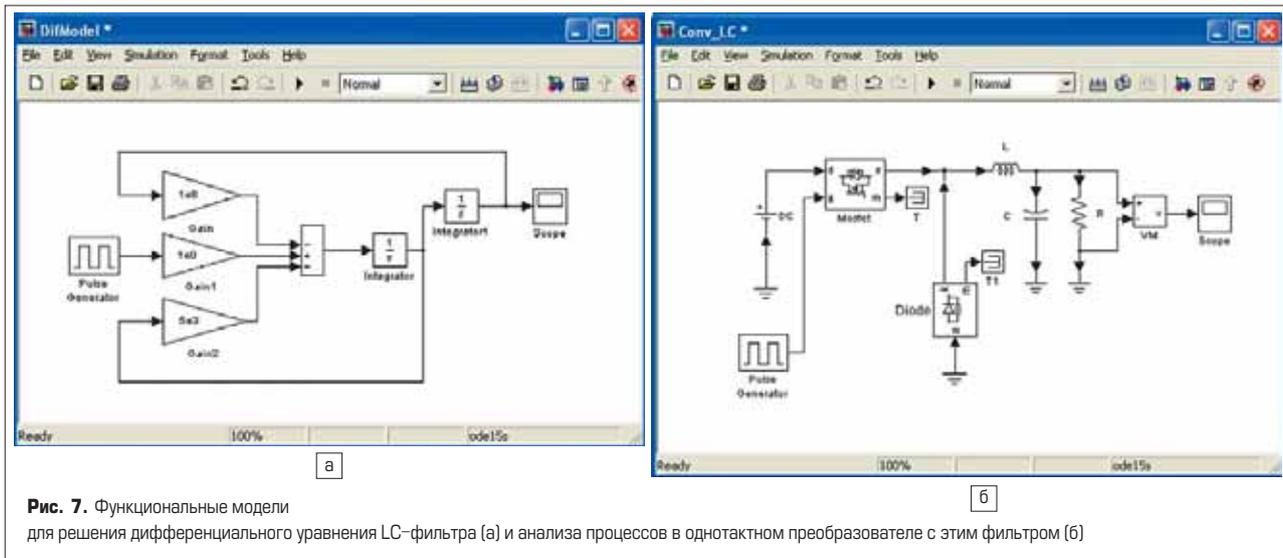


Рис. 7. Функциональные модели

для решения дифференциального уравнения LC-фильтра (а) и анализа процессов в однотактном преобразователе с этим фильтром (б)

Таблица 2

Библиотека	Блок	Параметры
Simulink\Sources	Pulse Generator — генератор прямоугольных импульсов	Amplitude (V) — 1, Period (s) — 0.00001, Pulse Width (%) — 50
SimPowerSystems\Electrical Sources	DC Voltage Source — источник постоянного напряжения	Amplitude (V) — 10
SimPowerSystems\Power Electronics	Mosfet — транзистор Mosfet	Параметры без изменения
SimPowerSystems\Power Electronics	Diode — диод	Параметры без изменения
Simulink\Sinks	Terminator — заглушка для информационного порта транзистора и диода	—
SimPowerSystems\Elements	Series RLC Branch — последовательно соединенные RLC-элементы Resistance Inductance Capacitance	10 Ом, L=0, C=inf; 0,5 мГн, R=0, C=inf; 20 мкФ, R=0, L=0.
SimPowerSystems\Measurements	Voltage Measurement — измеритель напряжения	—
Simulink\Sinks	Scope — осциллограф	—

- *Initial condition source* [источник начального значения выходного сигнала]:
 - *internal* — внутренний;
 - *external* — внешний (появляется дополнительный вход, на который необходимо подать сигнал, задающий начальное значение).

- *Initial condition* [начальные условия] — установка начального значения выходного сигнала интегратора. Параметр доступен при выбранном *internal*.

Время моделирования в рассматриваемой модели **Stop time** выбрано 0,002, а максимальный шаг дискретизации **Max step size** выставлен **auto**. Эти параметры установлены в меню **Simulation/Simulation parameters** окна модели. Процесс нарастания выходного напряжения LC-фильтра при нулевых начальных условиях отражает временная диаграмма, полученная после запуска модели решения дифференциального уравнения (рис. 8а).

Далее строится функциональная модель однотактного преобразователя с LC-фильтром, имеющего те же самые значения параметров. Эта схема представлена на рис. 7б и содержит кроме фильтра источник питания и два ключевых элемента (транзистор и диод), работающих в противофазе. Основные параметры блоков схемы сведены в таблице 2.

Время моделирования и шаг дискретизации остаются такими же, как и при решении диф-

ференциального уравнения. Временная диаграмма процесса нарастания выходного напряжения представлена на рис. 8б. Обе сравниваемые временные диаграммы (рис. 8) аналогичны. Однако следует отметить, что во втором случае выброс (перерегулирование) напряжения меньше. Также ниже по уровню постоянная составляющая напряжения после окончания переходного процесса. Это обусловлено наличием напряжения отпирания с величиной 0,8 В у обратного диода. При нулевом значении этого напряжения анализируемые кривые переходных процессов полностью совпадают.

Теперь следует рассмотреть переходные процессы в преобразователе при скачкообразном изменении сопротивления нагрузки. Для этого используется функциональная модель преобразователя, рассмотренная выше и представленная на рис. 7б. Для установки начальных условий используется команда *powerinit*. Ниже приводятся основные варианты применения этой команды.

Powerinit — инициализация SPS-модели

Назначение: Задание начальных условий.

Синтаксис:

- *powerinit('sys','look')* — выводятся начальные значения переменных модели *sys*.
- *powerinit('sys','reset')* — устанавливаются нулевые начальные значения переменных модели *sys*.

- *powerinit('sys','steady')* — устанавливаются начальные значения переменных модели *sys* таким образом, чтобы расчет начался из точки установившегося режима.
- *powerinit('sys','set',p)* — устанавливаются начальные значения переменных модели *sys*, заданные вектором *p*. Порядок следования переменных можно определить командой, записываемой как *powerinit('sys','look')*.
- *powerinit('sys','setb',state,value)* — устанавливает начальное значение *value* переменной *state* модели *sys*.

Вернемся к рассматриваемому примеру 2. Запускается функциональная модель с клю-

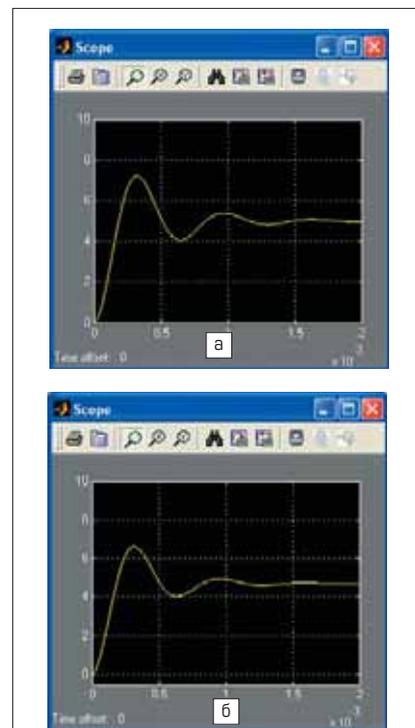
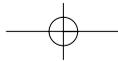


Рис. 8. Временные диаграммы выходного напряжения, полученные из функциональных моделей фильтра (а) и однотактного преобразователя (б)



чевыми элементами. По окончании модельного времени определяются начальные условия с помощью набираемой в командном окне команды для функциональной модели, имеющей название Conv_LC:

```
powerinit('Conv_LC','look');
```

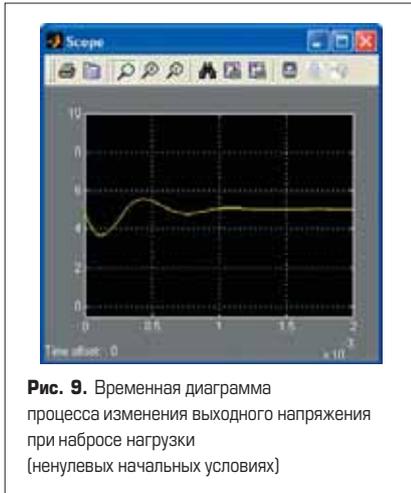
Получаемый ответ:

```
Current values of Initial states:
Uc_C = -5.5511e-016
Il_L = 0
Uc_snutber Diode = 1.1102e-015
Uc_snutber Mosfet = 10
```

С помощью другой команды:

```
powerinit('Conv_LC','setb','Uc_C',5)
```

вводится начальное значение напряжения на конденсаторе фильтра, равное 5 В, при том же нулевом токе индуктивности. Временная диаграмма нового процесса после запуска (рис. 9) показывает, что выходное напряжение в момент пуска составляет 5 В. Затем появляется провал, поскольку происходит только разряд (практически без заряда) конденсатора из-за нулевого начального тока индуктивности. После окончания процесса нарастания тока в дросселе происходит заряд конденсатора, и напряжение на нем становится постоянным по уровню.



Анализ динамического режима преобразователя с общей отрицательной обратной связью

Наиболее сложным при создании функциональной модели стабилизированного преобразователя напряжения является построение контура обратной связи. Выходное напряжение преобразователя регулируется за счет широтно-импульсной модуляции пульсирующего напряжения, поступающего на вход LC-фильтра, то есть изменением относительного угла модуляции (коэффициента заполнения импульсов в пределах периода преобразования). При этом угол модуляции θ имеет ограничения, а именно $0 \leq \theta_{\min} \leq \theta_{\max} \leq 1$. Эти ограничения говорят, что угол модуляции может быть близким к 0 (выходное напряжение име-

ет низкий уровень) или к 1 (выходное напряжение равняется входному).

Таким образом, на вход фильтра поступают импульсы с амплитудой, равной входному напряжению, а их длительность T (T — период коммутации ключей) определяется сигналом управления. Граничные значения угла модуляции θ_{\min} и θ_{\max} задают допустимый диапазон изменения этого параметра, связанного с возможностями контура обратной связи. Зависимость угла модуляции от выходного напряжения, определяющего сигнал управления, можно задать следующим образом:

$$\theta = \begin{cases} \theta_N + k[u_{2N} - u_2]; & \text{при } u_{2\min} \leq u_2 \leq u_{2\max} \\ \theta_{\max}; & \text{при } u_2 < u_{2\min} \\ \theta_{\min}; & \text{при } u_2 > u_{2\max} \end{cases},$$

где θ_N — номинальное значение угла модуляции при нулевом сигнале ошибки; k — коэффициент передачи канала обратной связи; u_{2N} — номинальное значение выходного напряжения; $u_{2\max}$ и $u_{2\min}$ — граничные значения выходного напряжения, при которых $\theta = \theta_{\min}$ и $\theta = \theta_{\max}$ соответственно. Эти граничные значения определяются как $u_{2\max} = u_{2N} + (\theta_N - \theta_{\min})/k$ и $u_{2\min} = u_{2N} + (\theta_N - \theta_{\max})/k$.

С учетом этих выражений строится функциональная модель преобразователя с контуром обратной связи. При построении относительно сложной модели используется подсистема, включающая в себя некоторую часть блоков, что позволяет существенно упростить конфигурацию модели. Для создания подсистемы возможны два подхода. Первый состоит в выделении в S-модели или SPS-мо-

дели тех элементов, которые войдут в подсистему. Для этого их располагают так, чтобы включить в подсистему только нужные блоки. Затем с помощью ЛКМ и динамической рамки выделяют требуемую часть схемы и через меню окна модели **Edit/Create subsystem** формируют подсистему. Второй подход заключается в использовании специального блока **Subsystem** (подсистема) из библиотеки **Simulink** (раздел **Ports and Subsystem**). Этот блок перемещается во вновь созданное окно, открывается двойным нажатием ЛКМ, и в окне подсистемы собирается требуемая схема. После построения подсистема сохраняется командой **File/Save as...**

На рис. 10а приведена функциональная модель преобразователя с обратной связью под именем Conv_OS. Ее основные блоки за исключением подсистемы приведены в таблице 3.

Созданная подсистема Conv_OS/Subsystem (рис. 10б) содержит блоки, сгруппированные в таблице 4.

У подсистемы имеется один входной порт **In**, предназначенный для подачи в контур обратной связи сигнала в виде выходного напряжения u_2 . Поскольку этот контур построен из блоков библиотеки **Simulink** (рис. 10б), а силовой блок (рис. 10а) выполнен из блоков **SimPowerSystems**, то сигнал подается через измеритель напряжения. В то же время имеется три выходных порта, из которых только через **Out1** подается сигнал управления на транзисторный ключ, определяющий характер изменения угла модуляции в процессе запуска преобразователя.

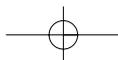
В функциональной модели контура обратной связи осуществляется сравнение выходного напряжения u_2 с опорным напряжением 5 В

Таблица 3

Библиотека	Блок	Параметры
SimPowerSystems\Electrical Sources	DC Voltage Source — источник постоянного напряжения	Amplitude (V) — 10
SimPowerSystems\Power Electronics	Mosfet — транзистор Mosfet	Параметры без изменения
SimPowerSystems\Power Electronics	Diode — диод	Параметры без изменения
Simulink\Sinks	Terminator — заглушка для информационного порта транзистора и диода	—
SimPowerSystems\Elements	Series RLC Branch — последовательно соединенные RLC-элементы Resistance Inductance Capacitance	10 Ом, L=0, C=inf; 0,5 мГн, R=0, C=inf; 20 мкФ, R=0, L=0.
SimPowerSystems\Measurements	Voltage Measurement — измеритель напряжения	—
Simulink\Sinks	Scope, Scope1, Scope2 — осциллографы	—
Simulink\Signls Routing	Mux — мультиплексор для объединения ряда сигналов в один вектор	Number of inputs — 2

Таблица 4

Библиотека	Блок	Параметры
Simulink\Sources	Repeating Sequence — генератор треугольных импульсов	Time values — [0 1 2 3 4]/10 ⁻⁶ , Output values — [0 0.5 0 -0.5 0]
Simulink\Math Operations	Gain — усилитель	Gain — 10
Simulink\Math Operations	Sum — сумматор	List of signs — +-
Simulink\Math Operations	Relational operator — операция соотношения	Relational operator — >=
Simulink\Signls Routing	Mux — мультиплексор для объединения ряда сигналов в один вектор	Number of inputs — 2
Simulink\Discontinuities	Saturation — ограничение	Upper limit — 0.49; Lower limit — 0.49
Simulink\Sources	Constant — генератор постоянного напряжения Constant1	Constant value — 5; Constant value — 0.5
Simulink\Sources	In — входной порт подсистемы	—
Simulink\Sinks	Out — выходной порт подсистемы	—



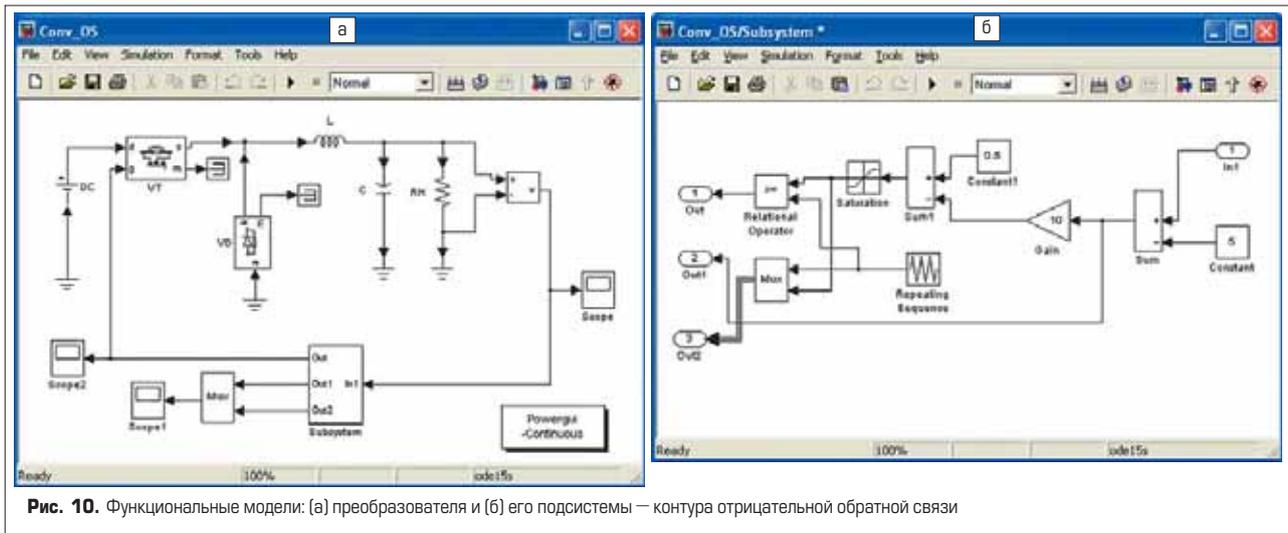
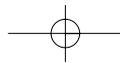


Рис. 10. Функциональные модели: (а) преобразователя и (б) его подсистемы — контура отрицательной обратной связи

с помощью сумматора **Sum**. Сигнал рассогласования усиливается **Gain** (коэффициент передачи k канала обратной связи), что позволяет получить требуемое приращение угла модуляции, добавляемое алгебраически (с учетом знака) к его номинальному значению $\theta_N = 0.5$ с помощью сумматора **Sum1**. Ограничения изменений угла модуляции относительно θ_N задаются блоком **Saturation**. Формируется ШИМ-сигнал для управления транзисторным ключом путем сравнения блоком **Relational operator** (выявляет моменты превышения или равенства) полученного приращения угла модуляции с линейно изменяющимся сигналом на выходе генератора **Repeating Sequence** треугольных импульсов. Задается форма импульсов на выходе этого генератора путем определения моментов пресечения нуля или достижения максимального (минимального) значения. У генератора устанавливается один период сигнала. Все установки указаны в таблице 4.

Для наблюдения за процессом запуска используются мультиплексоры **Mux**. Так, в подсистеме на осциллограф подаются треугольные импульсы генератора и угол модуляции, изменяющийся относительно номинального значения. В силовом блоке формируются сигнал рассогласования u_2 с опорным напряжением и сигнал управления транзистором.

Кроме того, осциллографы применяются для получения временных диаграмм, отражающих изменения напряжения u_2 и импульсов для управления транзисторным ключом. Время моделирования **Stop time** выбрано $150e-6$, а максимальный шаг дискретизации **Max step size** выставлен в $0.2e-7$. Эти параметры установлены в меню **Simulation/Simulation parameters** окна модели.

После построения модели, настройки ее блоков и запуска получены временные диаграммы (рис. 11). Особый интерес представляет изменение угла модуляции (рис. 11б), который достигает максимального или минимального значений, а при постепенном уменьшении сигнала рассогласования величина диапазона изменения угла модуляции становится меньше, что приводит к снижению пульсирующей составляющей выходного напряжения на рис. 11а. Если увеличить коэффициент передачи канала обратной связи, то получается изменение угла модуляции между предельными значениями, а затухание его отсутствует. В итоге произойдет возрастание пульсаций u_2 . Предлагаем читателю самому попробовать вносить различные значения указанного коэффициента передачи, амплитуды треугольных импульсов с генератора, границ насыщения в блоке **Saturation**, а затем наблюдать характер изменений временных диаграмм.

Работа рассматриваемой модели сопровождается комментариями в командном окне в виде:

Warning: Block diagram 'Conv_OS' contains 1 algebraic loop(s).

(Внимание: блок диаграмм 'Conv_OS' имеет 1 алгебраический контур (петлю).

Этот контур означает наличие такой ситуации, когда входная переменная какого-либо блока является алгебраической функцией выходной переменной того же блока. В результате замедляется процесс вычисления. Устранение указанного явления можно обеспечить введением элемента задержки на один шаг дискретизации. Например, возможно применение блока **Memory** из раздела **Discrete** библиотеки **Simulink**. Использование такого блока в подсистеме модели преобразователя (рис. 12) устраняет негативное влияние алгебраического контура.

Теперь рассмотрим применение **Powergui** для установки начальных условий. Располагается этот графический интерфейс **Powergui** в указателе библиотеки **Simulink Library Browser** в разделе **SimPowerSystems** при однократном щелчке левой кнопкой мыши на указатель этого дерева. Пиктограмму блока перетаскивают в окно модели (рис. 10а, справа внизу). Начнем с рассмотрения параметров этого интерфейса.

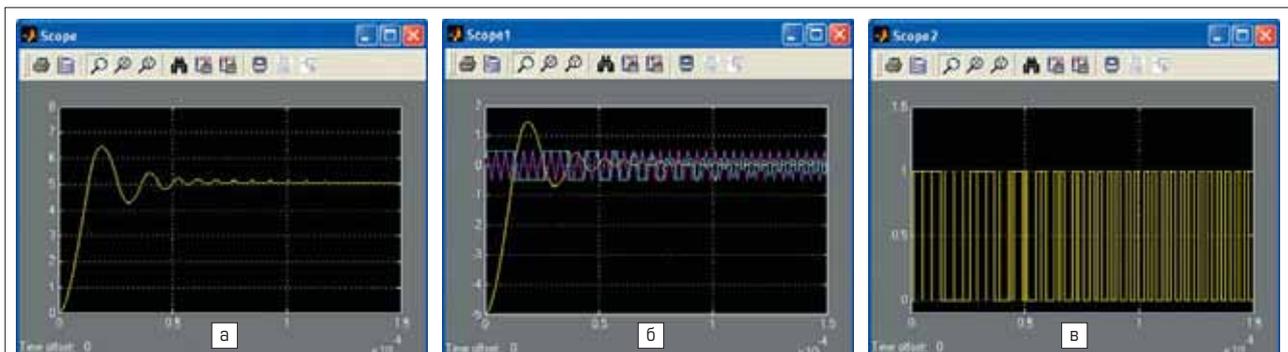
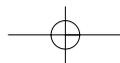


Рис. 11. Временные диаграммы выходного напряжения преобразователя (а), сигнала рассогласования (желтый), угла модуляции (голубой), треугольных импульсов генератора (розовый) (б) и импульсов управления транзисторным ключом (в)



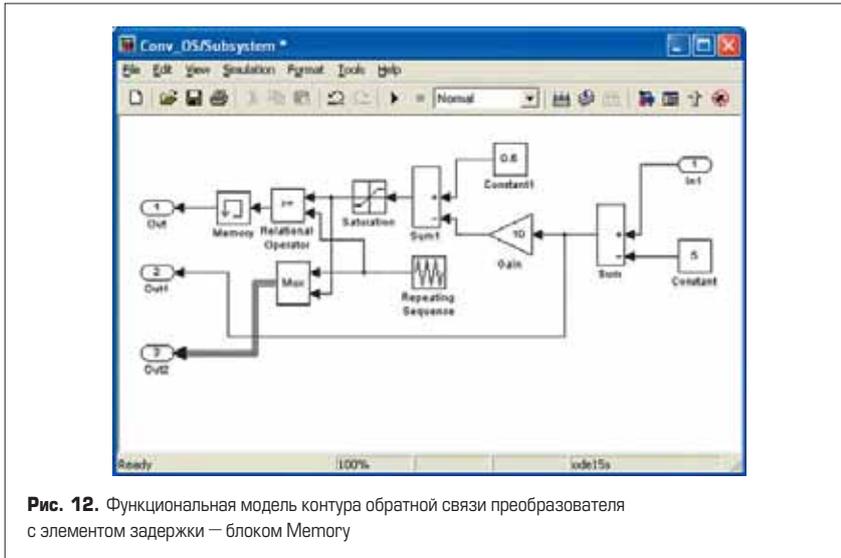
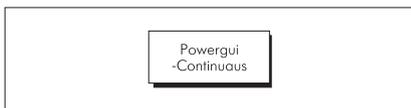


Рис. 12. Функциональная модель контура обратной связи преобразователя с элементом задержки — блоком Memory

Powergui — графический интерфейс пользователя



Назначение: блок является инструментом графического интерфейса пользователя и обеспечивает решение следующих задач:

- расчет схемы комплексным методом;
- расчет установившегося режима;
- дискретизация модели;
- задание начальных условий;
- инициализация трехфазных схем, содержащих электрические машины, таким образом, чтобы расчет начался с установившегося режима;
- анализ схемы с помощью инструмента Simulink LTI-Viewer;
- определение полного сопротивления (импеданса) цепи;
- выполнение гармонического анализа;
- создание отчета;
- создание файла характеристик намагничивания для нелинейного трансформатора.

Окно задания параметров представлено на рис. 13а.

Параметры блока:

- *Hide messages during analysis* — скрывать сообщения при проведении анализа. При установленном флажке подавляется вывод сообщений в командном окне MATLAB при выполнении расчетов.
- *Phasor simulation* — расчет схемы комплексным методом. При установленном флажке выполняется расчет схемы комплексным методом. При этом необходимо задать частоту источников в графе *Frequency*.
- *Frequency (Hz)* — частота (Гц). Частота сигналов источников при расчете схемы комплексным методом. При других видах анализа параметр недоступен.
- *Discretize electrical model* — дискретизация модели. При установленном флажке выполняется дискретизация модели. При этом необходимо задать шаг дискретизации в графе *Sample time*.

- *Sample time (s)* — шаг дискретизации. Параметр доступен, если задан режим дискретизации модели. При этом на пиктограмме блока будет показана величина этого параметра.
- *Steady State Voltages and Currents* — установившиеся значения напряжений и токов. Расчет установившихся значений переменных. При нажатии на кнопку открывается окно с соответствующими значениями.
- *Initial states Setting* — установка начальных значений. При нажатии на кнопку открывается окно, в котором отображаются начальные значения переменных. Эти значения можно изменять. Новые значения используются при расчете переходных процессов.
- *Load Flow and Machine Initializations* — инициализация схем, содержащих электрические машины.
- *Use LTI Viewer* — использование LTI Viewer. Применение инструмента Simulink LTI Viewer для анализа схемы.
- *Impedance vs Frequency Measurements* — определение импеданса цепи.
- *FFT Analysis* — гармонический анализ.
- *Generate Report* — создание отчета.

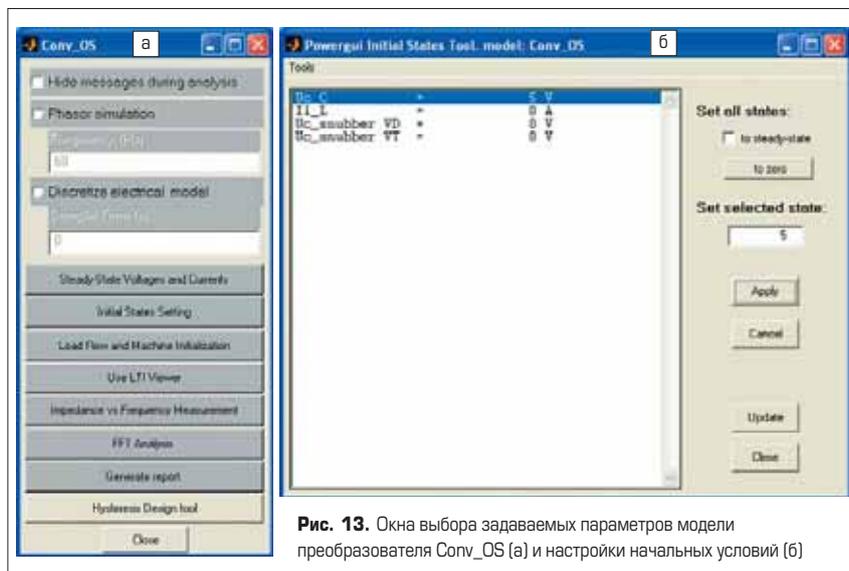


Рис. 13. Окно выбора задаваемых параметров модели преобразователя Conv_OS (а) и настройки начальных условий (б)

- *Hysteresis Design Tool* — инструмент расчета характеристики намагничивания.

Кнопкой **Initial states Setting** (рис. 13а) вызывается окно настройки **Powergui Initial states Setting**, в котором указаны все реактивные элементы (рис. 13б). После выбора требуемого элемента устанавливается начальное значение напряжения (тока). В качестве примера приведено начальное значение напряжения U_{c_C} на конденсаторе C , имеющее величину 5 В. В этом случае после запуска модели получена временная диаграмма выходного напряжения, аналогичная временной диаграмме на рис. 9.

Анализ динамических режимов преобразователя и двигателя с аналоговым и дискретным регуляторами

Цифровая система автоматического управления электроприводом содержит микропроцессорный (цифровой) регулятор, силовой преобразователь с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) для управления исполнительным двигателем, а также сам двигатель с нагрузкой. Сигнал на выходе цифровой части представляет собой ступенчатое напряжение, характер изменения которого в значительной мере зависит от шага дискретизации T_s . При относительно малом шаге дискретизации система считается непрерывной.

Довольно часто непрерывная часть электропривода описывается передаточной функцией вида:

$$W(S) = \frac{1}{T_1 S (T_0 S + 1)}$$

Зададим постоянным времени следующие значения: $T_1 = 1$ с и $T_0 = 0,1$ с. Построим функциональную модель системы с аналоговой и цифровой частями и сравним их динамические режимы [2]. У функциональной схемы (рис. 14а) основные блоки сведены в таблице 5.

В рассматриваемой схеме используются новые блоки. Это генератор ступенчатого сигнала **Step**, формирующий единичный скачок. У него достаточно установить только конеч-

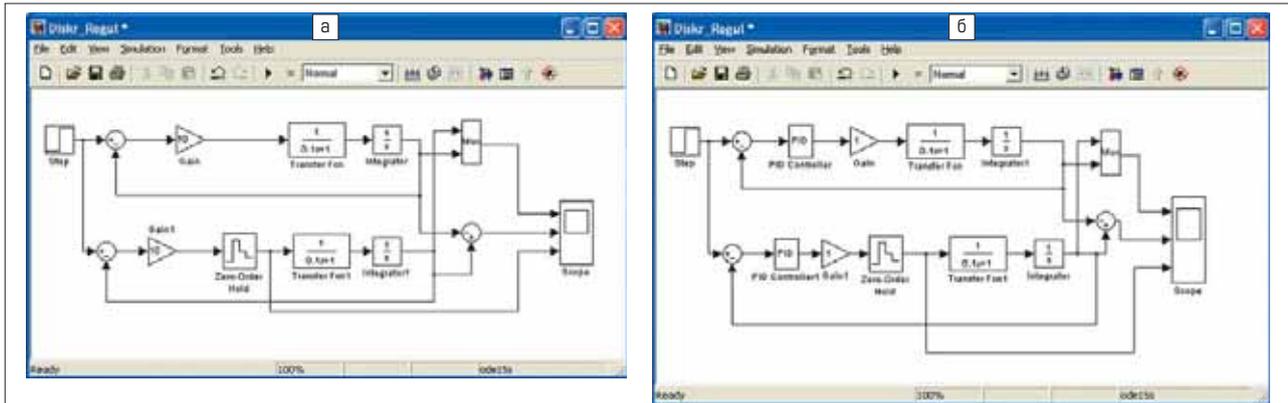


Рис. 14. Функциональная модель системы с аналоговым и цифровым управлением (а) и PID-регуляторами (б)

Таблица 5

Библиотека	Блок	Параметры
Simulink\Sources	Step — генератор ступенчатого сигнала	Final values — 1
Simulink\Math Operations	Gain — усилитель Gain1 — усилитель1	Gain — 10 Gain — 10
Simulink\Math Operations	Sum — сумматор	List of signs — +-
Simulink\Signals Routing	Mux — мультиплексор для объединения ряда сигналов в один вектор	Number of inputs — 2
Simulink\Discrete	Zero-Order Hold — экстраполиатор нулевого порядка	Sample time — 0.1
Simulink\Continuous	Integrator — интегратор	-
Simulink\Continuous	Transfer Fcn — передаточная функция	Numerator — [1] Denominator — [0.1 1]
Simulink\Sinks	Scope — осциллограф	-

ное значение выходного сигнала (см. табл. 5), равное 1. Другой блок — экстраполиатор нулевого порядка **Zero-Order Hold** — формирует дискретный сигнал. Единственная установка блока — шаг дискретизации **Sample time**, который первоначально задан равным 0,1. Передаточная функция **Transfer Fcn** содержит числитель **Numerator** и знаменатель **Denominator**, которые задаются в окне параметров в виде векторов коэффициентов полиномов, начиная с коэффициента при S с наибольшим показателем степени. Результат настройки высвечивается в пиктограмме блока (рис. 14а). В блоке интегрирования **Integrator** в рассматриваемом примере никаких настроек не требуется. Настройки осциллографа **Scope** выполнялись нами неоднократно в предыдущих уроках и здесь не приводятся.

После запуска модели получены временные диаграммы процессов (рис. 15а). Первая из них отражает характер изменения сигналов на выходе аналогового (фиолетовый цвет) и дискретного (желтый цвет) каналов, вторая — разность между двумя предыдущими сигналами (абсолютная погрешность, изменяющаяся во времени), третья — сигнал управления после экстраполиатора. Видно, что погрешность достигает 30%. Если у экстраполиатора уменьшить шаг дискретизации до 0,01, то погрешность снижается до 3%.

Введем в анализируемую модель ПИД-регулятор. Этот блок находится в библиотеке **Simulink Library Browser**. С помощью щелчка правой кнопкой мыши на строке **Simulink** появляется окно **Library: Simulink**, в котором надо открыть последовательно пиктограммы **Blocksets & Toolboxes / Simulink Extras / Additional Linear**. Из последнего подраздела библиотеки извлекается блок **PID Controller** в двух экземплярах и помещается в оба кана-

ла анализируемой системы (рис. 14б). В этом блоке имеется три настройки — **Proportional** (пропорциональное регулирование), **Integral** (интегральная составляющая регулирования), **Derivative** (дифференциальная составляющая регулирования). Для начала установим первую составляющую 10, вторую 0 и третью 0,8. Шаг дискретизации зададим 0,1. Усилители

оставлены для возможного изменения коэффициентов передачи каналов. Пока они (коэффициенты) равны 1.

После запуска получим временные диаграммы с другими значениями динамических показателей (рис. 15б). При этом переходный процесс стал аperiodическим, погрешность рассогласования уменьшилась с 30% до 18%, время переходного процесса сократилось более чем в 2 раза (сравните с рис. 15а). Читателю предлагается самому поэкспериментировать с выбором различных соотношений коэффициентов ПИД-регулятора и провести анализ изменений динамических параметров.

Подведем итоги урока 4.

1. С помощью блоков библиотек **Simulink** и **SimPowerSystems** имеется возможность анализа динамических режимов устройств силовой электроники путем:

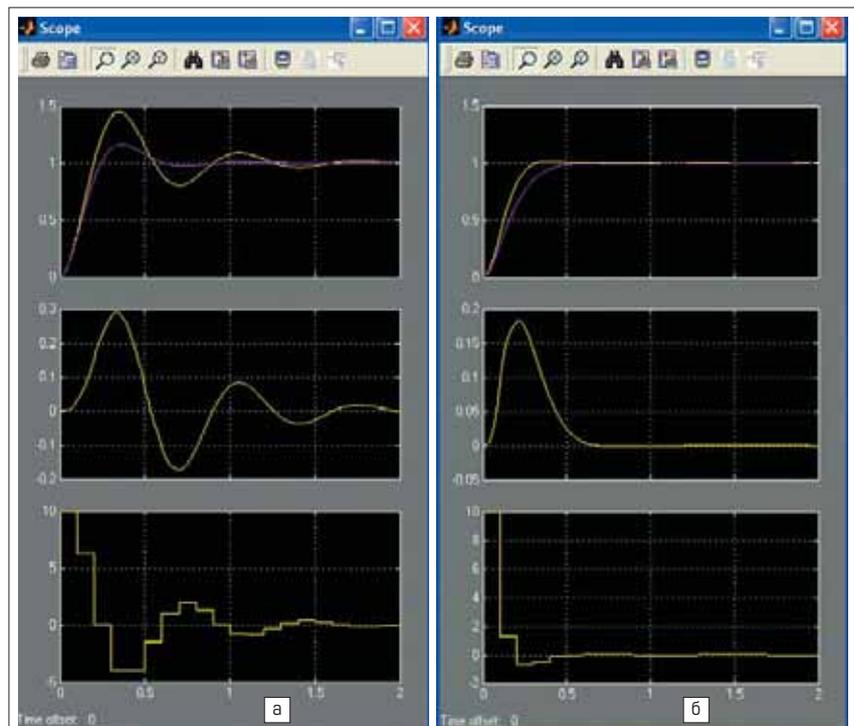
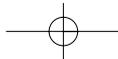


Рис. 15. Временные диаграммы процессов в функциональной модели системы с аналоговым и цифровым управлением (а) и PID-регуляторами (б)



- получения переходного режима у функциональных моделей, собранных из виртуальных элементов;
 - решения дифференциальных уравнений, описывающих процессы в анализируемой системе, с помощью функциональной модели;
 - подачи стандартного воздействия на вход объекта, описываемого передаточными функциями для отдельных подсистем или системы в целом.
2. Имеющиеся в библиотеке виртуальные модели различного типа электродвигателей применимы для анализа процессов их запуска-торможения.
 3. Метод понижения порядка производных с помощью интеграторов может использоваться для решения дифференциальных уравнений с нулевыми и ненулевыми начальными условиями при моделировании устройств силовой электроники.
 4. Совместное применение виртуальных элементов силового блока из **SimPowerSystems** и функциональных элементов блока управления из **Simulink** дает возможность моделирования устройств силовой электроники с замкнутой обратной связью и анализа их динамики.
 5. Начальные условия в функциональных моделях можно устанавливать либо с помощью команды **powerinit**, либо с помощью графического интерфейса пользователя **Powergui**.
 6. Изменение динамических свойств устройств и систем осуществляется путем применения ПИД-регулятора и выбора установок, определяющих вклад в сигнал регулирования пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих.

Литература

1. Черных И. В. Полезные мелочи // Exponenta PRO. Математика в приложениях. 2003. № 4.
2. Герман-Галкин С. Г., Кротенко В. В. Синтез цифрового регулятора подчиненной структуры электропривода в пакете Simulink // Exponenta PRO. Математика в приложениях. 2004. № 2.

