

# Школа MATLAB

## Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде MATLAB-Simulink

### Урок 12. Исследование импульсного повышающего регулятора постоянного напряжения

Данная статья продолжает цикл публикаций в разделе «Школа MATLAB» — «Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде MATLAB-Simulink». На сегодняшнем уроке мы исследуем повышающий импульсный регулятор постоянного напряжения. Содержание работы и методика ее проведения аналогичны тем, которые использовались в предыдущем уроке. Результаты моделирования представлены с помощью программных и инструментальных средств MATLAB. Для создания виртуальной лаборатории используются блоки библиотек Simulink и SimPowerSystems [3, 7–12].

Сергей Герман-Галкин,  
д. т. н., профессор

ggsg@yandex.ru

#### Введение

Помимо полупроводниковых элементов, силовые преобразователи содержат в своем составе реактивные элементы, индуктивности и емкости, способные накапливать и отдавать энергию. Полупроводниковые элементы преобразователя, работающие в ключевых режимах, обеспечивают разделение во времени процессов накопления энергии в реактивном элементе и отдачи этой энергии. Путем изменения соотношения между длительностью этих двух процессов достигается регулирование эффекта накопления энергии.

Устройства с такими свойствами относятся к классу преобразователей с управляемым эффектом на-

копления. Это инверторы тока и резонансные инверторы с регулированием выходного напряжения, коммутирующие устройства тиристорных преобразователей, корректоры коэффициента мощности, активные выпрямители, компенсаторы неактивных составляющих, активные фильтры и т. д. В данной статье рассматривается импульсный повышающий регулятор постоянного напряжения, являющийся типичным представителем преобразователя с регулируемым эффектом накопления. Исследование осуществлено на базе разработанной виртуальной лаборатории. Эта виртуальная установка, так же как установка из предыдущего урока, позволяет получать основные характеристики рассматриваемого преобразователя двумя способами:

- «обычным», изменяя выбранный параметр и регистрируя значения исследуемых величин при каждой симуляции с последующим построением требуемых характеристик;
- программным, при котором снятие и построение основных характеристик осуществляется автоматически.

#### Виртуальная лабораторная работа № 2. «Исследование импульсного повышающего регулятора постоянного напряжения»

##### Теоретические положения к выполнению работы

Схема повышающего импульсного преобразователя постоянного напряжения показана на рис. 1а. Его анализ и расчет широко описан в литературе [1, 4–6]. Расчетные схемы замещения этого преобразователя на коммутационных интервалах представлены на рис. 1б, в. В течение периода несущей частоты ( $T$ ) последовательно образуются два коммутационных интервала. На первом интервале при включенном транзисторе VT (рис. 1б) в накопительном дросселе  $L$  нарастает ток и запасается энергия, отбираемая от источника питания  $U_d$ . Диод VD на этом интерва-

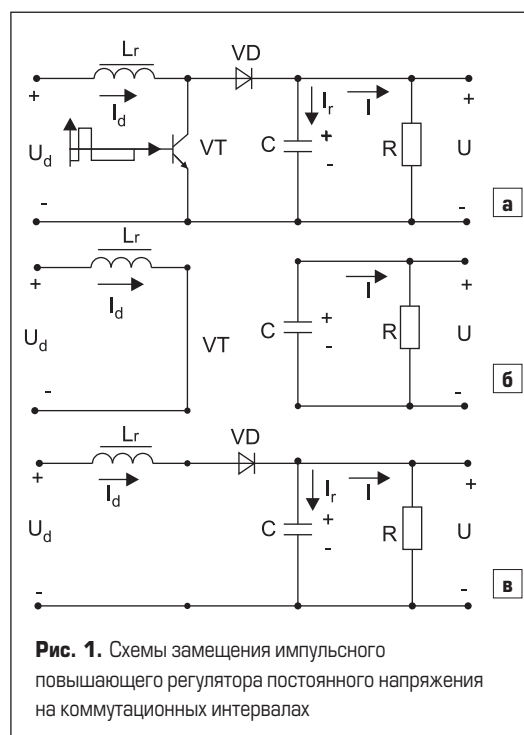


Рис. 1. Схемы замещения импульсного повышающего регулятора постоянного напряжения на коммутационных интервалах

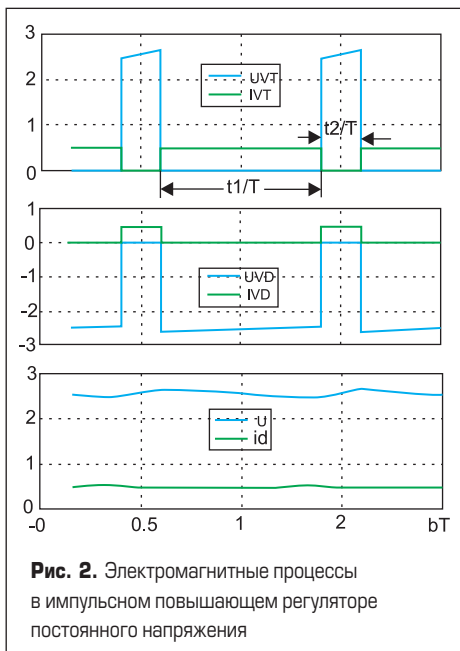


Рис. 2. Электромагнитные процессы в импульсном повышающем регуляторе постоянного напряжения

ле заперт обратным напряжением, а нагрузка R получает энергию от накопительного конденсатора C, имеющего определенный заряд. При выключенном транзисторе VT на втором интервале (рис. 1в) ток дросселя L через диод VD протекает на выход преобразователя в нагрузку R и в конденсатор C, подзаряжая его и этим восполняя потерю энергии на первом интервале. Электромагнитные процессы в квазиустановившемся режиме показаны на рис. 2.

При расчете характеристик импульсного повышающего регулятора постоянного напряжения необходим учет активного сопротивления обмотки дросселя L, активных сопротивлений диода и транзистора в прямом направлении. Так как дроссель L включается в контур с проводящим транзистором VT или диодом VD, то их прямые сопротивления нужно добавить к сопротивлению дросселя L. Это суммарное сопротивление в расчетной схеме замещения преобразователя (рис.1а) обозначено как r. Напряжение на выходе преобразователя вычисляется из условия нулевого

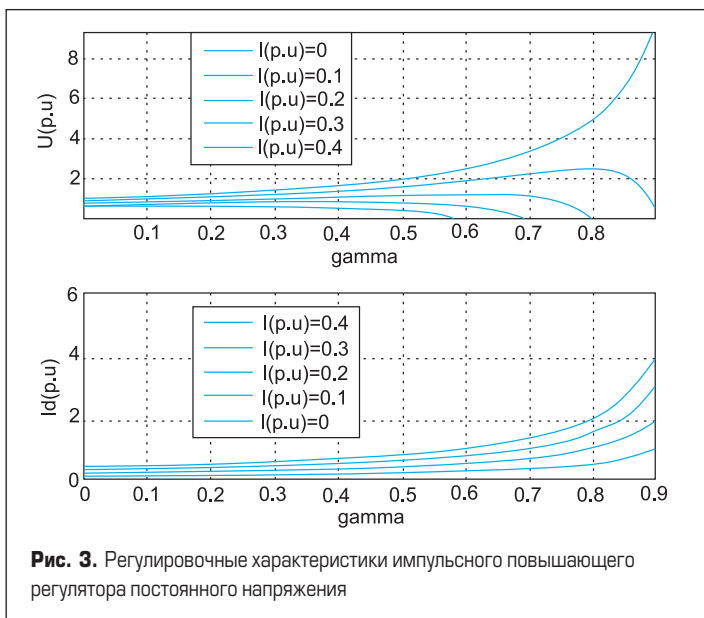


Рис. 3. Регулировочные характеристики импульсного повышающего регулятора постоянного напряжения

Таблица 1. Алгоритмы управления

Обозначение алгоритма	Момент включения транзистора	Момент выключения транзистора	Относительная длительность включения транзистора
Алгоритм $T_\gamma$	$nT$	$nT + \gamma T$	$\gamma$
Алгоритм $T_{I_d^*}$	$nT$	$I_d^*$	$\gamma = \tau_d / T \times \Delta I_d(p.u.) / (1 - I_d^*(p.u.))$
Алгоритм $I_d^* - \Delta I_d^*$	$I_d^* - \Delta I_d^*$	$I_d^* + \Delta I_d^*$	$\gamma = \tau_d / T \times \Delta I_d(p.u.) / (1 - I_d^*(p.u.))$
Алгоритм $T_{U^* - I_d^*}$	$nT$	$I_d^*(U)$	
Алгоритм $U^* - I_d^* - \Delta I_d^*$	$I_d^*(U) - \Delta I_d^*$	$I$	

Здесь  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ,  $I_d^*$  — заданный ток питания,  $\Delta I_d^*$  — заданная пульсация тока питания,  $U^*$  — заданное выходное напряжение,  $\Delta U^*$  — заданная пульсация выходного напряжения,  $\tau_d = L/r$  — постоянная времени в цепи питания,  $\tau = rC$  — постоянная времени нагрузки.

среднего напряжения на дросселе на периоде несущей частоты [1].

$$U(p.u.) = 1 / (1 - \gamma) - I(p.u.), \quad (1)$$

где относительные величины (p.u. — per units) определяются из выражений:

$$U(p.u.) = U / U_\phi, \quad I(p.u.) = I \times r / U_\phi, \quad \gamma = t_1 / T. \quad (2)$$

На рис. 3 показаны рассчитанные по уравнению (1) зависимости выходного напряжения и тока в цепи питания от относительной длительности ( $\gamma$ ) включенного состояния транзистора VT при различных токах нагрузки (регулировочные характеристики).

Регулировочные характеристики показывают, что диапазон регулирования выходного напряжения вверх от напряжения питания зависит от тока нагрузки (от сопротивления нагрузки). Диапазон изменения относительного тока нагрузки, где возможно регулирование напряжения нагрузки вверх от напряжения источника, ограничен значениями 0–0,1. При этом с возрастанием тока нагрузки уменьшается напряжение нагрузки. Зависимость тока питания от тока нагрузки можно получить из условия нулевого среднего тока конденсатора на периоде несущей частоты [1].

$$I_d(p.u.) = \gamma / (1 - \gamma) \times I(p.u.), \quad \text{где } I_d(p.u.) = I_d \times r / U_\phi. \quad (3)$$

Нагрузочные (внешние) характеристики преобразователя, рассчитанные по уравнению (1), и характеристики его КПД в допустимом

диапазоне изменения тока нагрузки представлены на рис. 4.

Эти характеристики показывают, что при рассмотренном управлении преобразователь представляет собой источник напряжения с достаточно «мягкой» нагрузочной характеристикой, который можно использовать как регулятор при неизменной нагрузке. При относительном токе нагрузки, близком к границе допустимого диапазона, КПД импульсного повышающего регулятора постоянного напряжения резко уменьшается. Поэтому для силовых регуляторов следует ограничивать значение предельного относительного тока. Характеристики импульсного повышающего регулятора постоянного напряжения с рассмотренным независимым способом управления, в котором период T задается тактовым генератором в схеме управления, а относительная длительность включенного состояния транзистора  $\gamma$  зависит от входного сигнала, определяют пределы регулирования преобразователя. Значения T и  $\gamma$  можно задавать и иными способами, но в любом случае они всегда будут ограничены рассчитанными пределами.

Как уже подчеркивалось, рассмотренный способ управления преобразователем независим от переменных состояния схемы. Ниже исследуется регулятор напряжения и с иными способами управления, в зависимости от которых существенно изменяются основные его характеристики и области возможного применения. Алгоритмы, реализуемые в системе управления с рассматриваемым импульсным повышающим регулятором постоянного напряжения, представлены в таблице 1.

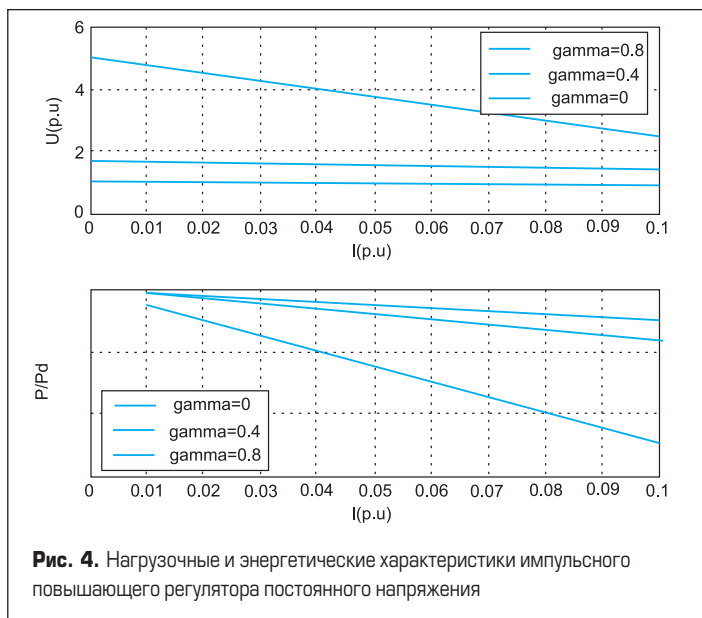


Рис. 4. Нагрузочные и энергетические характеристики импульсного повышающего регулятора постоянного напряжения

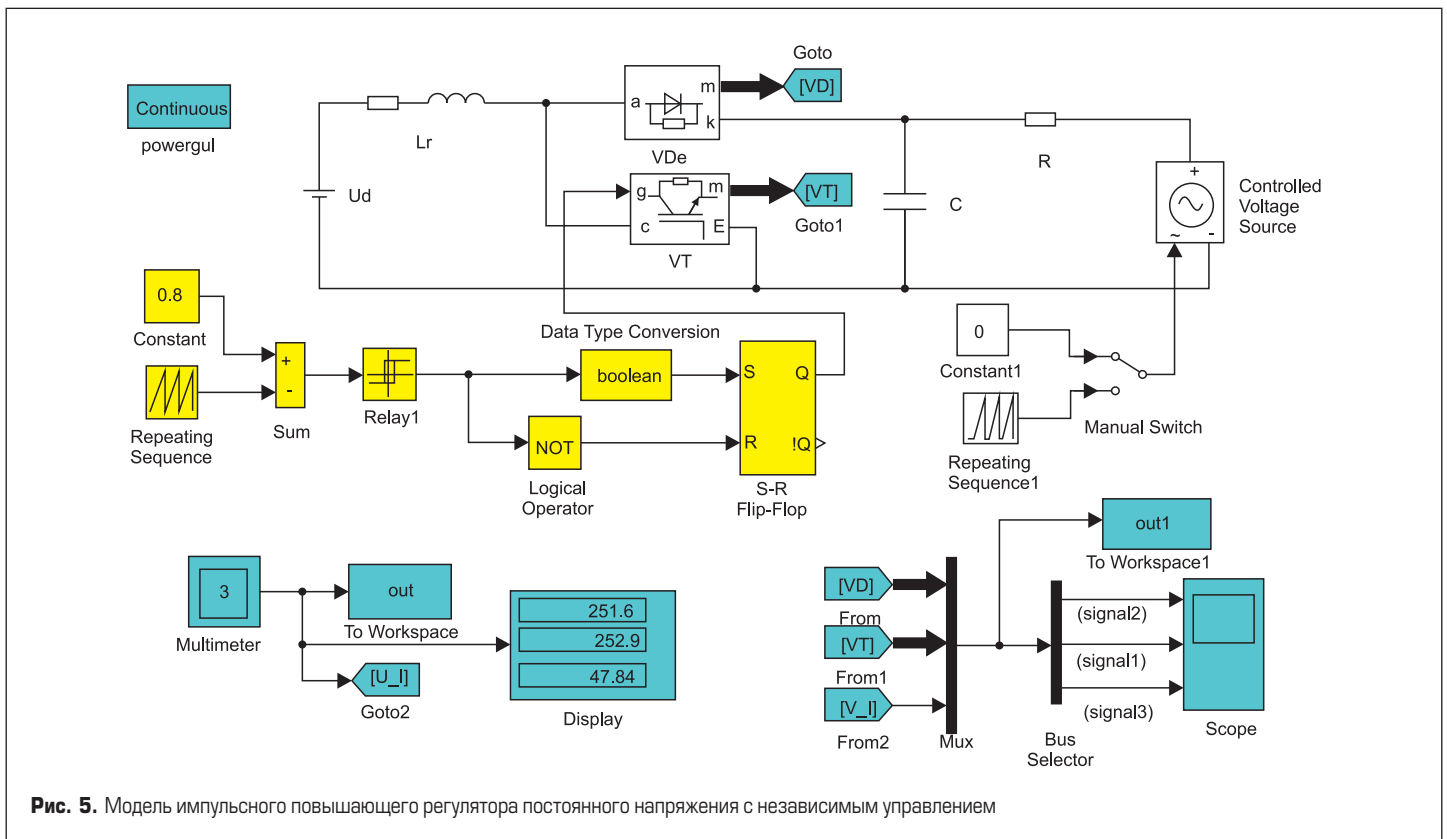


Рис. 5. Модель импульсного повышающего регулятора постоянного напряжения с независимым управлением

При независимом способе управления (алгоритм  $\_T\_y$ ), как уже было сказано выше, период  $T$  задается тактовым генератором в схеме управления, а относительная длительность включенного состояния транзистора  $\gamma$  зависит от входного сигнала. При всех остальных алгоритмах управления  $\gamma$  зависит от переменных состояния (табл. 1).

**Виртуальная лабораторная установка и ее характеристики**

Виртуальная лабораторная установка для исследований импульсного повышающего регулятора постоянного напряжения показана на рис. 5.

Разработка модели осуществлялась при использовании структурно-функциональных (пакет Simulink) и виртуальных (пакет расширения SimPowerSystems) блоков. Представление результатов моделирования реализуется программными и инструментальными средствами среды MATLAB-Simulink [2]. Во всех моделях время симуляции равно 0,7 с, шаг дискретизации (Max Step Size) —  $1e^{-5}$ .

Каждый блок пакетов Simulink и SimPowerSystems имеет окно настройки основных параметров. Библиотеки, названия, пиктограммы и параметры блоков, составляющих модель, помещены в таблицу 2.

Модель импульсного повышающего регулятора постоянного напряжения с независимым управлением содержит силовые блоки, блоки управления, блоки измерения и блоки передачи сигналов внутри модели и в рабочую область MATLAB.

Для визуализации мгновенных значений токов и напряжений на полупроводниковых элементах преобразователя используется блок *To Workspace 1* (рис. 5), окно параметров

которого (табл. 2.) настраивается на запись в рабочее пространство MATLAB в течение короткого временного отрезка значений токов и напряжений. В листинге 1 приведена программа для построения мгновенных относительных токов, напряжений и потерь мощности на полупроводниковых элементах преобразователя. На рис. 6 построены эти характеристики для максимального тока нагрузки.

Листинг 1.

```

Ub=150; r=0.5; Ib=Ub/r;
t=0:1e-5:24e-5;% Считывание времени из рабочего пространства
IVT1=out1(:,1);% Считывание тока транзистора из рабочего пространства
IVT=IVT1/Ib;
UVT1=out1(:,2);% Считывание напряжения транзистора из рабочего пространства
UVT=UVT1/Ub;
IVD1=out1(:,3);% Считывание тока диода из рабочего пространства
IVD=IVD1/Ib;
UVD1=out1(:,4);% Считывание напряжения диода из рабочего пространства
UVD=UVD1/Ub;
U1=out1(:,5);
U=U1/Ub;
I1=out1(:,6);
I=I1/Ib;

PVD=UVD.*IVD;% Расчет потерь в диоде
PVT=UVT.*IVT;% Расчет потерь в транзисторе

subplot(3,1,1);% Создание окна для построения графиков
plot(t,UVT,t,IVT);% Построение графиков напряжения и тока транзистора
grid on;
ylabel('UVT(p.u) IVT(p.u)');
legend('UVT','IVT','Location','Best');

subplot(3,1,2);% Создание окна для построения графиков
plot(t,IVD,t,UVD);% Построение графиков напряжения и тока диода
ylabel('UVD(p.u) IVD(p.u)');
legend('UVD','IVD','Location','Best');
grid on;

subplot(3,1,3);% Создание окна для построения графиков
plot(t,PVT,t,PVD);% Построение графиков напряжения и тока нагрузки
grid on;
xlabel('time');
ylabel('PVT(p.u) PVD(p.u)');
legend('PVT','PVD','Location','Best');
    
```

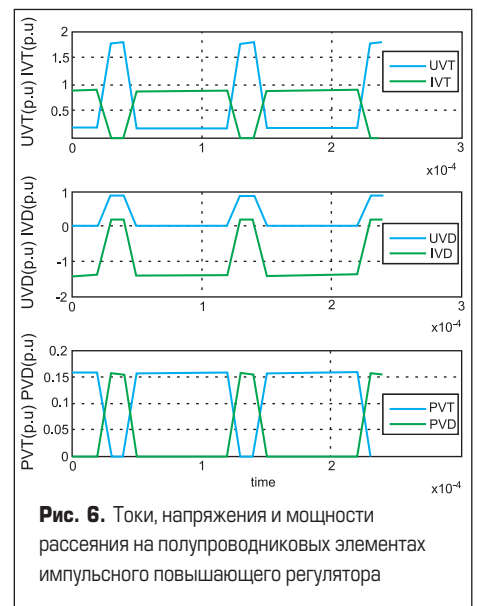


Рис. 6. Токи, напряжения и мощности рассеяния на полупроводниковых элементах импульсного повышающего регулятора

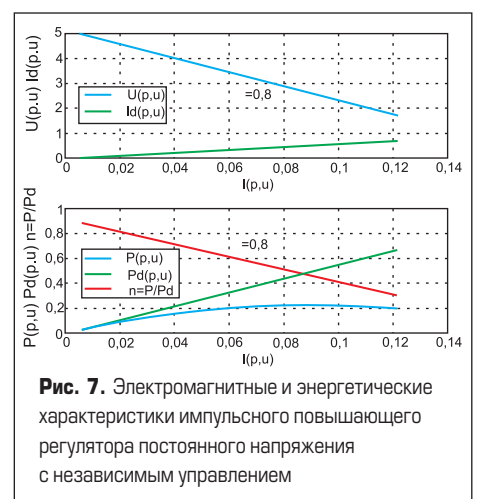


Рис. 7. Электромагнитные и энергетические характеристики импульсного повышающего регулятора постоянного напряжения с независимым управлением

Листинг 2.

```

Ub=150; r=0.4; Ib=Ub/r;% Параметры регулятора
Id1=out(:,1);% Считывание значений тока питания
из рабочего пространства
Id=Id1./Ib;% Расчет относительных значений тока питания
U1=out(:,2);% Считывание значений выходного напряжения
из рабочего пространства
U=U1./Ub;% Расчет относительных значений выходного напряжения
I1=out(:,3);% Считывание значений выходного тока
из рабочего пространства
I=I1./Ib;% Расчет относительных значений выходного тока
P=U.*I;% Расчет относительных значений выходной мощности
Pd=Id.*I;% Расчет относительных значений выходной мощности
n=P./Pd;
subplot(2,1,1);% Построение электромагнитных характеристик
plot(I,U,I,Id);
grid on;
xlabel('I(p.u)');
ylabel('U(p.u),Id(p.u)');
legend('U(p.u)','Id(p.u)','Location','Best');
subplot(2,1,2);% Построение энергетических характеристик
plot(I,P,I,Pd,I,n,I,0);
grid on;
xlabel('I(p.u)');
ylabel('P(p.u),Pd(p.u),n=P/Pd');
legend('P(p.u)','Pd(p.u)','n=P/Pd','Location','Best');
    
```

Электромагнитные и энергетические характеристики преобразователя показаны на рис. 7. Для получения их во всем диапазоне изменения тока нагрузки преобразователя в модели переключатель Manual Switch устанавливается в нижнее положение, в блоке Repeating Sequence1 формируется линейно изменяющийся сигнал. При этом для достижения установившегося режима работы преобразователя при различном токе нагрузки скорость изменения сигнала подбирается достаточно низкой.

Для построения основных характеристик в относительных величинах служит программа, представленная в листинге 2.

Спектральные характеристики тока в цепи питания и напряжения на выходе импульсного регулятора строятся по проведению симуляции с использованием блока Powergui и соответствующей настройки осциллографа так, как это описано в предыдущем уроке.
























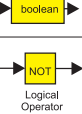
Для того чтобы блок Scope «видел» исследуемый сигнал, необходимо в выпадающем меню, которое открывается по щелчку правой кнопкой мыши на линии сигнала, выбрать команду Signal Properties и в открывшемся окне в поле Signal Name обозначить сигнал (в данном примере это signal1, signal2, signal3).

После проведения симуляции вкладка FFT Analysis блока Powergui открывает окно графического редактора для получения спектральной характеристики. В правой части окна находятся поля, с помощью которых можно просмотреть исследуемый сигнал и осуществить его спектральный анализ.

В верхнем поле выбирается переменная, имя которой с помощью блока Scope занесено в рабочее пространство. В поле Input из открывающегося списка выбирается конкретный анализируемый сигнал. Следующие три поля позволяют задать его участок, который должен соответствовать квазиустановившемуся режиму работы схемы, и просмотреть этот участок в верхнем левом поле окна.

В поле Fundamental frequency (Hz) задается основная частота исследуемого сигнала. В поле Max frequency (Hz) задается максимальная частота спектра. Выбор этой частоты определяется задачами анализа. Поле Frequency axis позволяет по оси абсцисс откладывать частоту

Таблица 2. Библиотеки, названия, пиктограммы и параметры блоков

Библиотека	Блок	Параметры блока
SimPowerSystems\Power Electronics	 Силовой диод	Resistance Ron (Ohms) — 0,1 Inductance Lon (H) — 0 Forward voltage Vf (V) — 1 Initial current Ic (A) — 0 Snubber resistance Rs(Ohm) — 1e5 Snubber capacitance Cs-inf
SimPowerSystems\Power Electronics	 Силовой транзистор	Resistance Ron (Ohms) — 0,1 Inductance Lon (H) — 0 Forward voltage Vf (V) — 1 Current 10% nail time Tf (s) — 1e-6 Current nail time Tf (s) — 2e-6 Initial current Ic (A) — 0 Snubber resistance Rs(Ohm) — 1e5 Snubber capacitance Cs-inf
SimPowerSystems\Elements	 Дроссель	Branch type — R L, Resistance (Ohms) — 0,3, Inductance (H) — 1e-3, Measurements — Branch current
Sim Power Systems\Electrical Source	 Источник питания	Amplitude (V) — 150, Measurements — None
SimPowerSystems\Elements	 Конденсатор фильтра и сопротивление нагрузки	C-Branch type — C, Capacitance C(F) — 1e-3, Measurements — Branch voltage, R-Branch type — R, Resistance (Ohms) — 5, Measurements — Branch current
SimPowerSystems\Electrical Source	 Управляемый источник против ЭДС	Source type — DC, Initial amplitude — 0, Measurements — None
Simulink\Source	 Генератор задания против ЭДС	Time values — [0; 0,2; 0,71], Output values — [0; 0; 750]
Simulink\Signal Routing	 Ручной переключатель	
Simulink\Source	 Блок задания против ЭДС	
SimPowerSystems\Measurement	 Измеритель напряжения и тока нагрузки	Available Measurements — Ib; r; L; Ub; C; Ib; R Selected Measurements — Ub; C; Ib; R
Simulink\Sinks	 Блок записи тока питания, напряжения и тока нагрузки в рабочее пространство	Variable name — out Limit data points to last — 4500, Decimation — 10, Sample time — 1e-5, Save format — Array
Simulink\Sinks	 Блок записи квазиустановившихся электромагнитных процессов	Variable name — out1, Limit data points to last — 25, Decimation — 1, Sample time — 1e-5, Save format — Array
Simulink\Port & Subsystem	 Блоки передачи/приема сигнала	
Simulink\Sinks	 Цифровой измеритель тока питания, напряжения и тока нагрузки	
Simulink\Signal Routing	 Мультиплексер	Number of inputs 3
Simulink\Signal Routing	 Селектор сигналов	Signals in the bus: signal1, signal2, signal3 Selected signals: signal1, signal2, signal3
Simulink\Sinks	 Осциллоскоп	Scope parameters: General — Number of axes-3, Time range — 0.002, Sample time — 1e-5 Data history: Variable name — out1. Format — structure with time
Simulink\Source	 Блок задания входного сигнала	
Simulink\Source	 Тактовый генератор несущего пилообразного	Time values — [0; 0,0001] Output values — [0; 1]
Simulink\Math Operation	 Сумматор	List of signal ±
Simulink\Dicontinuous	 Блок реле	Switch on point — 0,01 Switch off point — -0,01 Output when on — 1 Output when off — 0
Simulink\Logic and Bit Operation	 Блок изменения формата числа	Output date type mode — Boolean
Simulink\Logic and Bit Operation	 Блок логического отрицания	Operator — NOT
Simulink\Simulink Extras/Flip Flops	 R-S-Триггер	Initial condition (state of Q) — 0

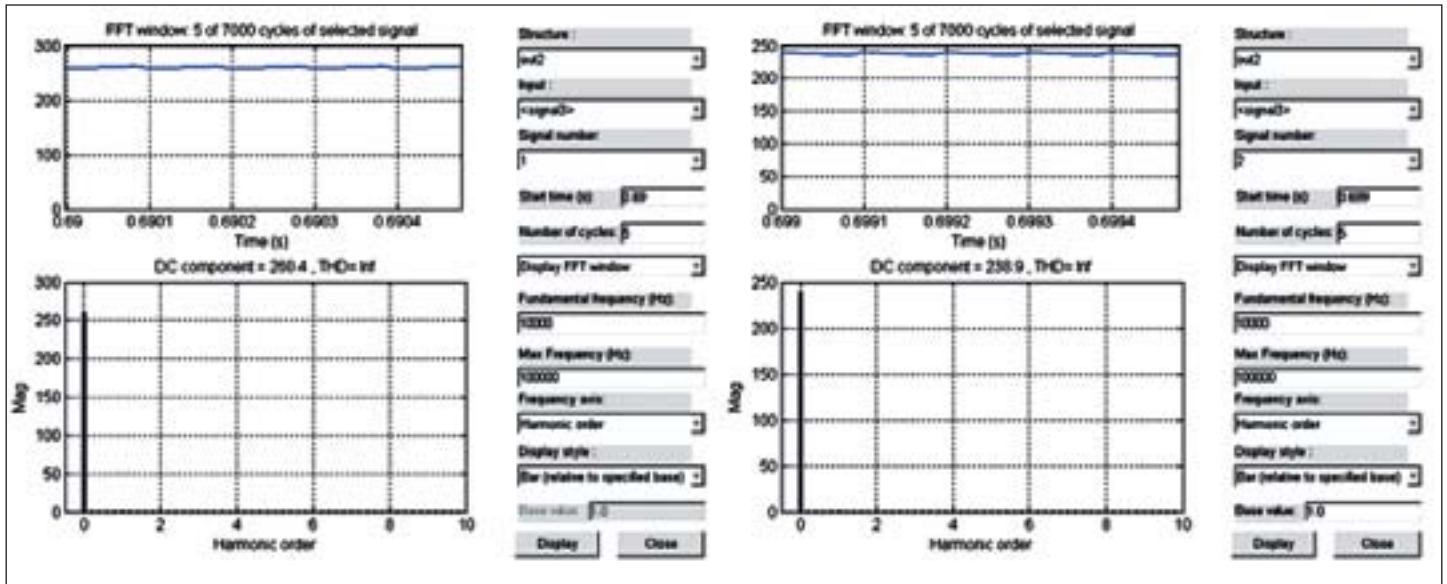


Рис. 8. Электромагнитные процессы и спектры тока питания и напряжения нагрузки импульсного повышающего регулятора постоянного напряжения

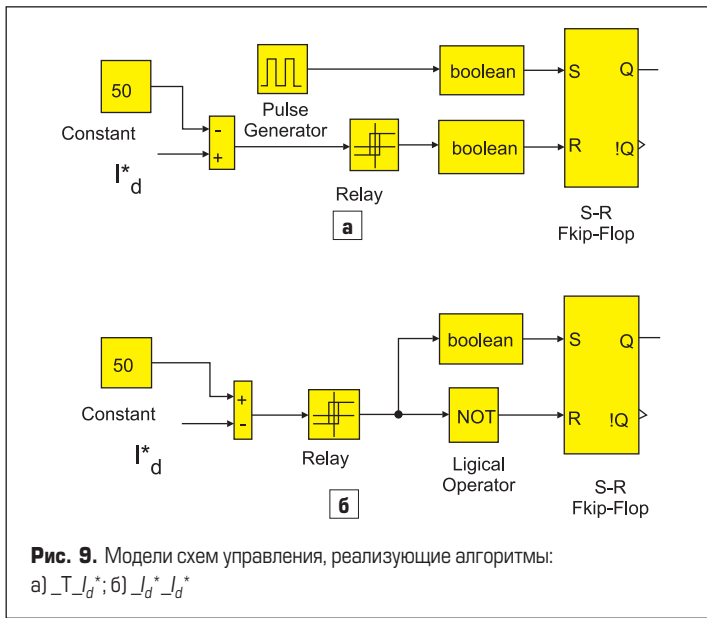


Рис. 9. Модели схем управления, реализующие алгоритмы: а)  $\_T I_d^*$ ; б)  $\_I_d^* I_d^*$

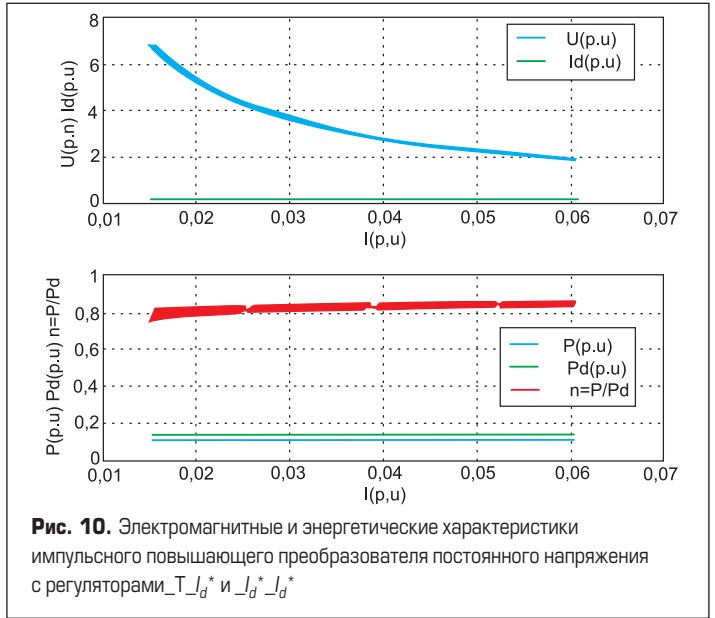


Рис. 10. Электромагнитные и энергетические характеристики импульсного повышающего преобразователя постоянного напряжения с регуляторами  $\_T I_d^*$  и  $\_I_d^* I_d^*$

ту или номер гармоники. В раскрывающемся списке поля *Display style* можно выбрать способ представления спектра (графически или в табличном, цифровом виде) в левом нижнем поле окна. Спектральные характеристики тока в цепи питания и напряжения на выходе импульсного регулятора приведены на рис. 8.

Основные характеристики импульсного повышающего регулятора постоянного напряжения можно получить и «обычным» способом. Для этого ручной переключатель (Manual Switch) устанавливается в верхнее положение.

При снятии регулировочной характеристики параметры нагрузки остаются без изменений, значение противоЭДС в блоке (Constant 1) устанавливается равным постоянной  $(0-4) \cdot U_d$ . Изменяется напряжение управления (блок Constant) от 0 до 0,9 В каждые 0,1 В. При этом моделирование проводится для каждого значения напряжения управления. Результаты заносятся в таблицу, по данным которой строится регулировочная характеристика  $U = f(u_c)$ .

При снятии нагрузочной (внешней), электромагнитной и энергетических характеристик па-

раметры нагрузки R, C остаются без изменений, противоЭДС изменяется от  $5 \cdot U_d$  до 0 В каждые  $U_d$  В. При этом напряжение управления остается постоянным (0,8 В). Моделирование проводится для каждого значения противоЭДС. Результаты заносятся в таблицу, по данным которой строятся перечисленные характеристики. В блоке *Display* (рис. 5) измеряемые величины представлены в nfrjql последовательности: 1 — средний ток питания ( $I_d$ ); 2 — среднее напряжение на нагрузке (U); 3 — средний ток в нагрузке (I).

Характеристики (рис. 7), полученные на модели, практически совпадают с теоретическими характеристиками импульсного повыша-

ющего регулятора постоянного напряжения (рис. 4). Это позволяет сделать вывод об адекватности модели и возможности использовать ее для исследования свойств импульсного повышающего регулятора постоянного напряжения при иных способах управления. При этом в модели будет изменяться лишь управляющая часть, а силовая и измерительные части остаются без изменения.

Модели схемы управления, реализующие алгоритмы  $\_T I_d^*$  и  $\_I_d^* I_d^*$ , приведены на рис. 9. В первом случае транзистор VT в модели (рис. 5) включается от тактового импульса генератора (Pulse Generator, рис. 9),

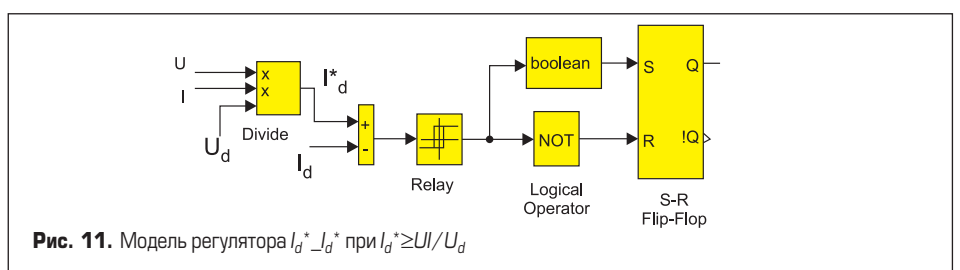
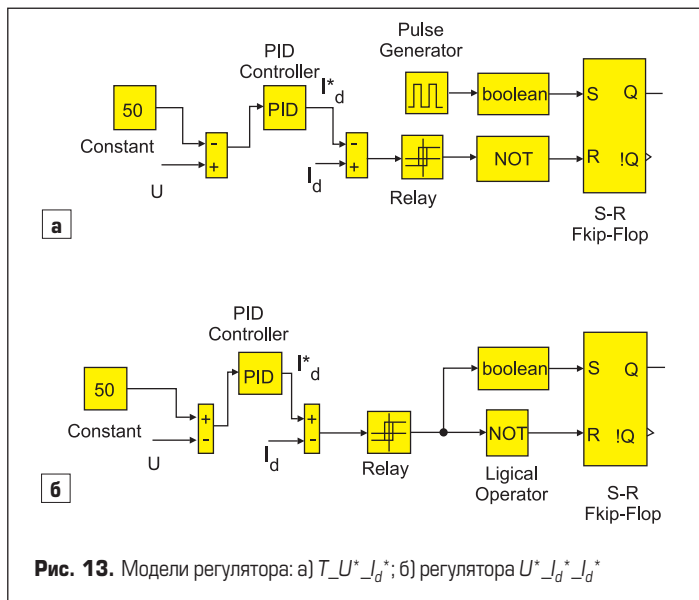
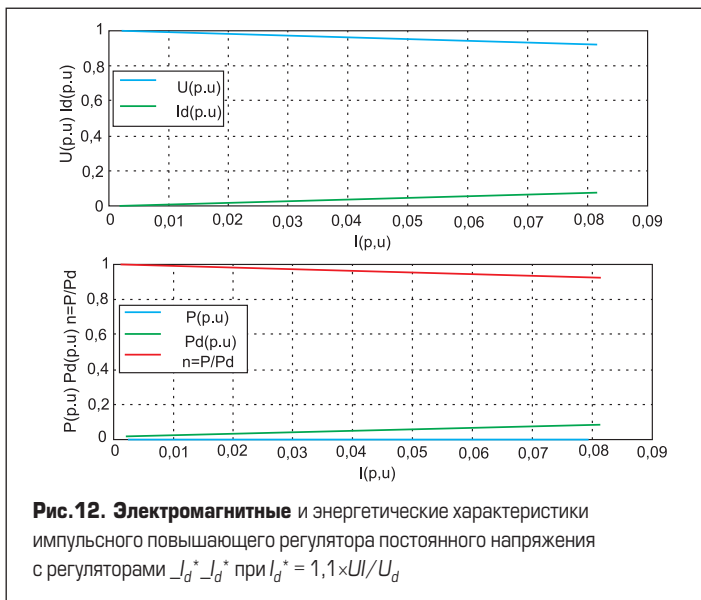


Рис. 11. Модель регулятора  $I_d^* I_d^*$  при  $I_d^* \geq UI/U_d$



а выключается в момент, когда ток питания достигнет заданной величины.

Во втором случае в схеме реализуется скользящий режим относительно заданного тока в цепи питания  $I_d^*$  («токовый коридор»). Частота переключения в этом случае определяется шириной петли гистерезиса в блоке *Relay*, постоянной времени  $\tau_d = L/r$  и заданным значением тока  $I_d^*$ . Результаты моделирования импульсного повышающего регулятора с рассмотренными способами управления совпадают, для случая  $I_d^* = const$  они представлены на рис. 10.

При рассмотренном управлении импульсный повышающий регулятор представляет собой источник мощности. Нагрузочная характеристика имеет вид гиперболы, КПД преобразователя регулятора не зависит от нагрузки.

Для повышения КПД импульсного повышающего регулятора постоянного напряжения ток задания в цепи питания следует формировать в соответствии с уравнением баланса мощности в цепи питания и на выходе  $I_d^* \geq UI/U_d$ . Схема управления для этого случая приведена на рис. 11, а основные характеристики, полученные на модели, — на рис. 12.

В этом случае регулятор является источником напряжения с достаточно «жесткой» нагрузочной характеристикой и высоким КПД.

Модели схем управления с регуляторами  $T_U^* I_d^*$  и  $U^* I_d^* I_d^*$  приведены на рис. 13. В первом случае транзистор VT в схеме (рис. 1) включается от тактового импульса генератора (Pulse Generator, рис. 13), а выключается в момент, когда ток в цепи питания достигнет заданной величины. Во втором случае в схеме реализуется скользящий режим относительно заданного тока. Релейный контур задания тока питания как в первом, так и во втором случае подчинен контуру задания напряжения на нагрузку. В качестве регулятора напряжения использован линейный ПИД-регулятор.

Электромагнитные и энергетические характеристики преобразователя, полученные на модели, приведены на рис. 14.

При рассмотренном способе управления импульсный повышающий регулятор представляет собой стабилизатор напряжения с достаточно хорошими электромагнитными и энергетическими свойствами, что позволяет считать такой способ управления наиболее рациональным при построении повышающего источника питания

постоянного тока. Основные характеристики импульсного повышающего регулятора постоянного напряжения можно получить и «обычным» способом — так, как это описано выше.

**Литература**

1. Бирзникс Л. В. Импульсные преобразователи постоянного тока. М.: Энергия, 1974.
2. Герман-Галкин С. Г. Школа MATLAB. Урок 6. Программные и инструментальные средства представления результатов моделирования // Силовая электроника. 2007. № 4.
3. Герман-Галкин С. Г. MATLAB & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. Учебное пособие для вузов. СПб: Корона-Век, 2008.
4. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники. Ч. 2. Новосибирск, 2000.
5. Розанов Ю. К. Силовая электроника. М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
6. Семенов Б. Ю. Силовая электроника: от простого к сложному. М.: СОЛОН-Пресс, 2005.
7. Худяков В. Моделирование устройств силовой электроники. Урок 1. Основные инструменты Simulink // Силовая электроника. 2005. № 1.
8. Худяков В. Школа MATLAB. Урок 2. Библиотека SimPower Systems // Силовая электроника. 2005. № 2.
9. Худяков В. Школа MATLAB. Урок 3. Построение SPS моделей с полупроводниковыми элементами // Силовая электроника. 2005. № 3.
10. Худяков В. Школа MATLAB. Урок 4. Анализ динамических свойств устройств силовой электроники во временной области // Силовая электроника. 2005. № 4.
11. Худяков В. Школа MATLAB. Моделирование устройств силовой электроники. Урок 5. Анализ устройств силовой электроники в частотной области // Силовая электроника. 2006. № 1.
12. Черных В. Simulink: среда создания инженерных приложений. М.: Диалог-МИФИ, 2004.
13. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB SimPower-Systems Simulink. СПб: ПИТЕР, 2008.

