

ШКОЛА MATLAB

Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде MATLAB Simulink

Урок 11. Виртуальные лаборатории импульсных источников питания

Данная статья открывает новый цикл в разделе «ШКОЛА MATLAB» — «Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде MATLAB Simulink». Содержание лабораторных работ и методика их проведения аналогичны тем, которые используются в реальных учебных лабораториях. Результаты моделирования реализуются программными и инструментальными средствами MATLAB. Для моделирования используются блоки библиотек Simulink и SimPowerSystems [3, 7–12].

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

ggsg@yandex.ru

Введение

В технических устройствах встречается множество первичных источников электроэнергии, которые вырабатывают ее в виде постоянного напряжения. К ним относятся солнечные батареи, работающие на основе фотоэффекта, термоэлектрогенераторы и магнетогидродинамические (МГД) генераторы, топливные элементы, использующие энергию химических реакций, аккумуляторы как источники запасенной электроэнергии, электромашинные генераторы постоянного напряжения и т. д. Для приведения постоянных напряжений этих источников к требуемому уровню, его стабилизации или (и) регулирования требуются преобразователи постоянного напряжения в постоянное. Мощность таких преобразователей может достигать десятков и даже сотен киловатт. При таких мощностях целесообразно применение однокаскадных преобразователей.

В первом разделе цикла «Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде MATLAB Simulink» рассмотрен ряд базовых схем преобразователей, осуществляющих прямое (однокаскадное) преобразование постоянного напряжения в постоянное без использования какого-либо промежуточного преобразования, например постоянного напряжения в переменное с последующим преобразованием переменного напряжения в постоянное. Изучение и исследование этих преобразователей осуществляется с использованием виртуальных лабораторных установок. Они позволяют получать основные характеристики рассматриваемых преобразователей двумя способами:

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

Виртуальная лабораторная работа №1. «Исследование импульсного понижающего регулятора постоянного напряжения»

Теоретические положения к выполнению работы

Теоретические положения к виртуальной лабораторной работе по исследованию импульсного понижающего регулятора постоянного напряжения базируются на литературных источниках [1, 4–6]. Схема импульсного понижающего регулятора постоянного напряжения показана на рис. 1а. Расчетные схемы

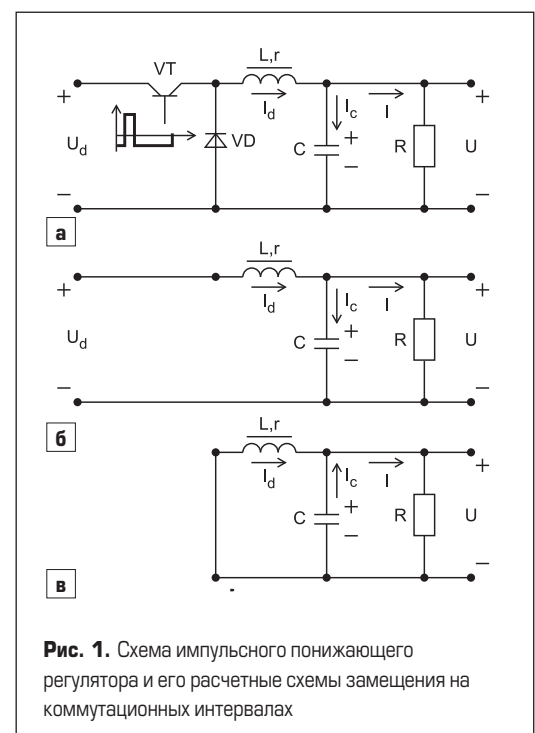


Рис. 1. Схема импульсного понижающего регулятора и его расчетные схемы замещения на коммутационных интервалах

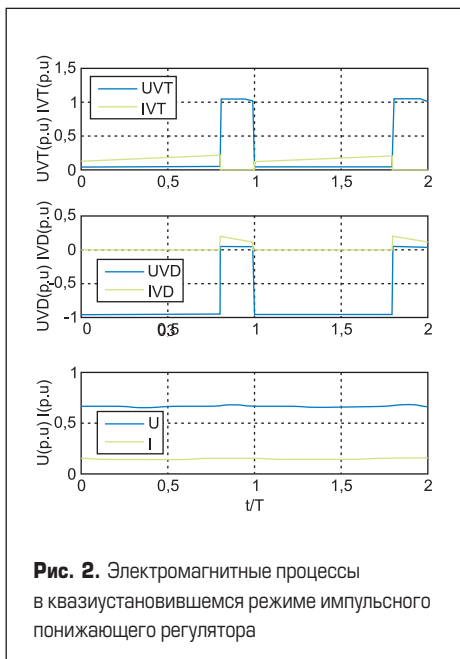


Рис. 2. Электромагнитные процессы в квазиустановившемся режиме импульсного понижающего регулятора

замещения регулятора на коммутационных интервалах представлены на рис. 1б, в. В течение периода несущей частоты (Т) последовательно образуются два коммутационных интервала.

На первом интервале при включенном транзисторе VT (рис. 1б) источник постоянного напряжения Ud подключен к нагрузке через накопительный дроссель L. При этом энергия, отбираемая от источника, запасается в дросселе L, в конденсаторе C и расходуется в сопротивлении нагрузки R.

При выключенном транзисторе VT на втором интервале (рис. 1в) ток дросселя L через диод VD и ток конденсатора C протекают на выход преобразователя в нагрузку R.

Идеализированные электромагнитные процессы в квазиустановившемся режиме показаны на рис. 2.

При расчете характеристик преобразователя 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, пренебрегая разницей их прямых сопротивлений, можно добавить их прямые сопротивления к сопротивлению дросселя L. Это суммарное сопротивление в расчетной схеме замещения преобразователя (рис. 1а) обозначено через r. Среднее напряжение на выходе преобразователя (в нагрузке) вычисляется из условия нулевого среднего напряжения на дросселе на периоде несущей частоты [1].

$$U(p.u) = \gamma(1/(1+\beta)), \quad (1)$$

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

$$U(p.u) = U/U_{\phi}, \gamma = t_1/T, \beta = r/R. \quad (2)$$

По уравнениям (1, 2) рассчитываются регулировочные ($U(p.u) = f(\gamma), \beta = const$) характеристики импульсного понижающего регулятора постоянного напряжения. Эти характеристики представлены на рис. 3.

Зависимость тока питания от тока нагрузки можно получить из условия баланса мощности.

$$I_d(p.u) = \gamma I(p.u). \quad (3)$$

Нагрузочные (внешние) ($U(p.u) = f(I(p.u)), \gamma = const$) характеристики понижающего регулятора постоянного напряжения рассчитываются по уравнению

$$U(p.u) = \gamma - I(p.u). \quad (4)$$

В уравнениях (3, 4) $I(p.u) = I/I_{\phi}, I_d(p.u) = I_d/I_{\phi}$. Энергетические характеристики, к которым отнесем мощность в цепи питания, мощность в нагрузке и КПД регулятора, рассчитываются по выражениям:

$$P_d(p.u) = I_d(p.u), P(p.u) = U(p.u) \times I(p.u), \eta = P(p.u)/P_d(p.u). \quad (5)$$

Графики нагрузочных и энергетических характеристик приведены на рис. 4.

Основные характеристики импульсного понижающего регулятора показывают, что при рассмотренном управлении он представляет собой источник напряжения с линейной регулировочной характеристикой и достаточно «жесткой» нагрузочной характеристикой, такой преобразователь можно использовать как регулятор или стабилизатор напряжения.

Зависимости КПД преобразователя от тока нагрузки для различных γ показаны на рис. 4б. Эти зависимости, рассчитанные как отношение мощности в нагрузке к мощности источника, показывают, что для получения хороших энергетических свойств диапазон относительного тока нагрузки не должен превышать значения 0,01–0,04.

Рассмотренный способ управления импульсным регулятором реализуется путем сравнения пилообразного (несущего) сигнала и входного постоянного сигнала [4, 5]. Этот способ управления здесь и в дальнейшем называется *независимым* от переменных состояния схемы.

Виртуальная лабораторная установка и ее характеристики

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

Разработка модели регулятора с независимым управлением осуществлялась при использовании структурно-функциональных (пакет Simulink) и виртуальных (пакет расширения Sim Power System) моделей. Представление результатов моделирования реализуется программными и инструментальными средствами среды MATLAB Simulink [2].

Модель импульсного понижающего регулятора содержит силовую, управляющую и измерительную части. Каждый блок модели имеет окно настройки основных параметров. Библиотеки и пиктограммы блоков, их назначение в модели, а также параметры блоков, составляющих модель, ниже помещены в таблицу 1. Время моделирования (Stop time) —

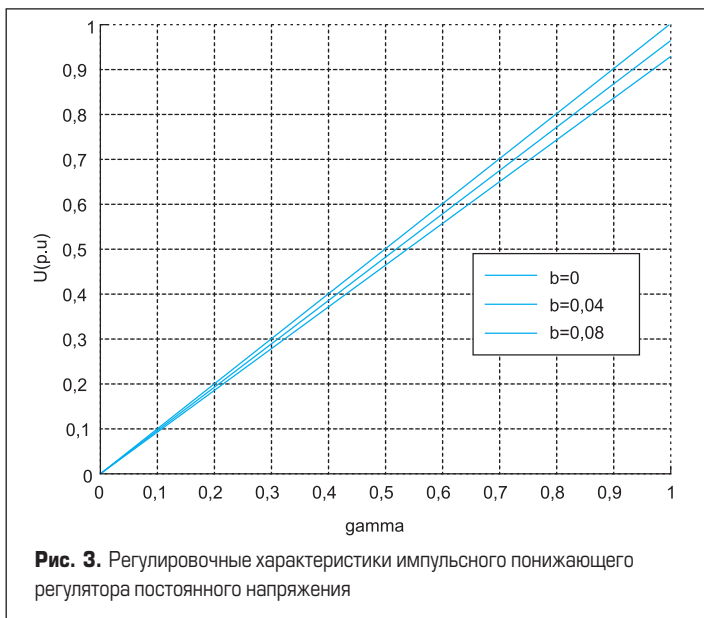


Рис. 3. Регулировочные характеристики импульсного понижающего регулятора постоянного напряжения

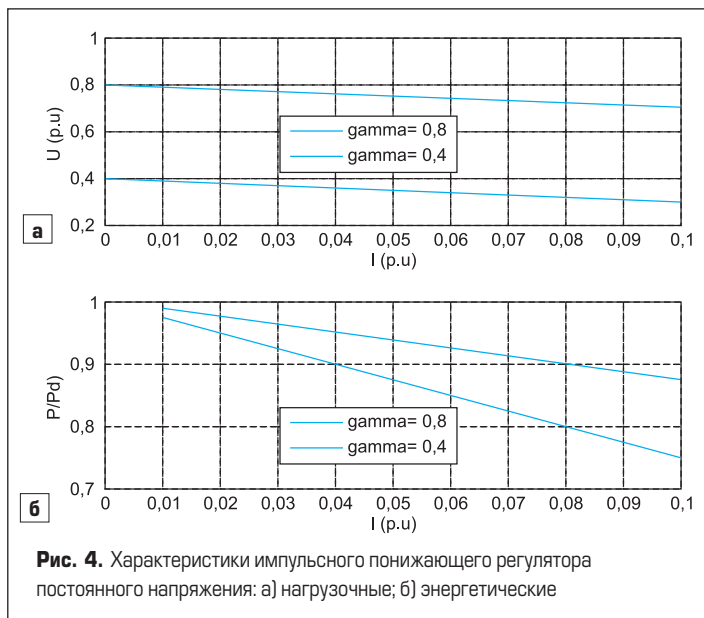


Рис. 4. Характеристики импульсного понижающего регулятора постоянного напряжения: а) нагрузочные; б) энергетические

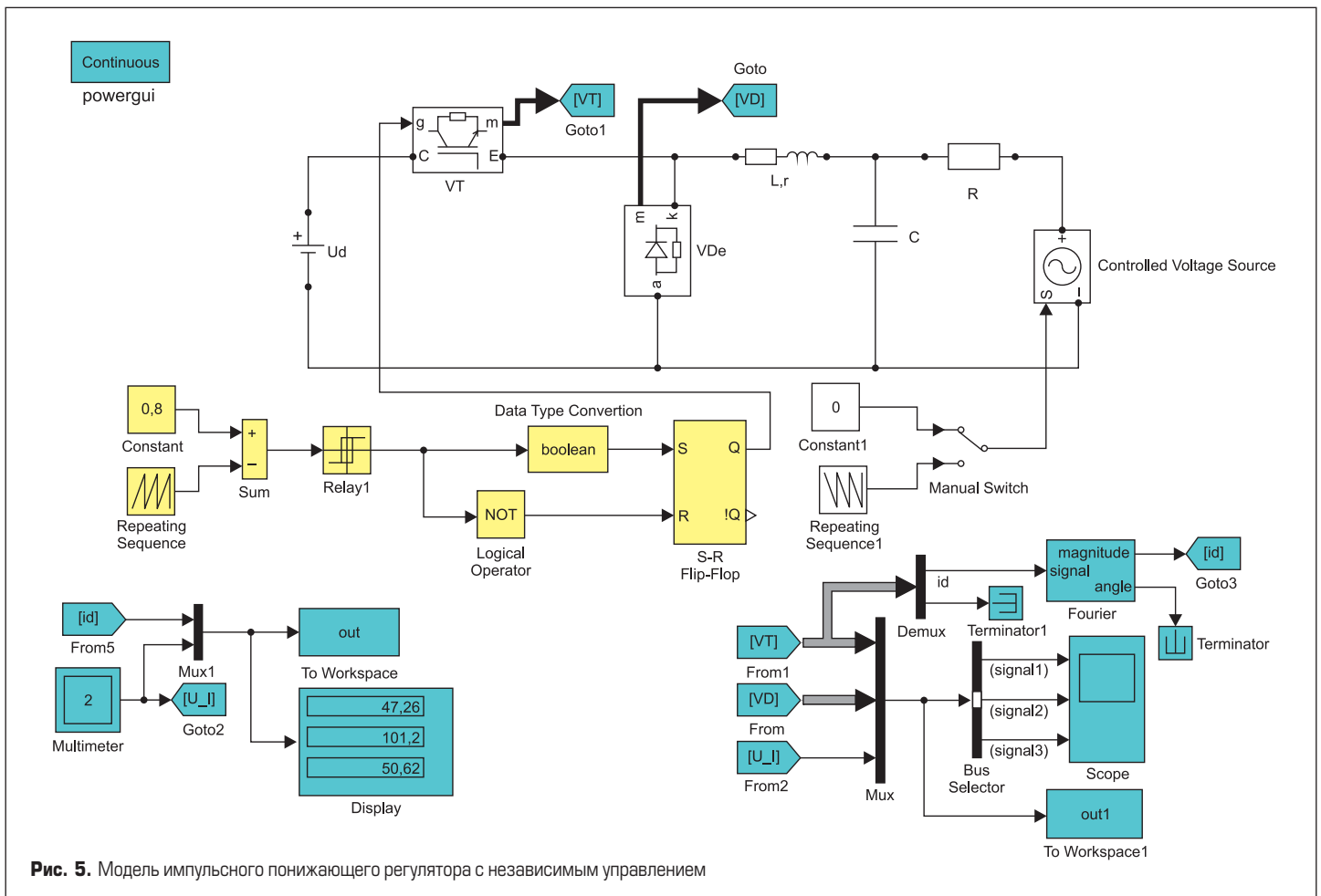


Рис. 5. Модель импульсного понижающего регулятора с независимым управлением

0,7 с, шаг дискретизации при моделировании (Max Step Size) — 10^{-5} .

Мгновенные значения тока и напряжения на транзисторе и диоде, напряжения и тока нагрузки можно наблюдать на экране осциллографа (рис. 5).

Эти же значения в относительных единицах, а также мгновенные относительные мощности потерь в транзисторе и диоде строятся после проведения моделирования при выполнении программы, представленной в листинге 1.

На рис. 6 показаны электромагнитные процессы в относительных величинах для $E = 0$ В и $\gamma = 0,8^*$ (* Во всех расчетах базовые значения переменных равны: $U_b = U_d = 150$ В; $I_b = U_b/r = 375$ А. Относительные значения переменных вычисляются путем деления абсолютных значений этих переменных на базовые значения.).

Снятие и построение внешней, электромагнитной и энергетических характеристик можно реализовать программным способом. Для этого следует перевести переключатель (Manual switch) в нижнее положение и после

симуляции выполнить программу, представленную в листинге 2.

Все эти характеристики в относительных величинах показаны на рис. 7.

Спектральные характеристики тока в цепи питания и напряжения на выходе импульсного регулятора строятся по проведению симуляции с использованием блока Powergui и соответствующей настройки осциллографа.

Для того чтобы блок Scope «видел» исследуемый сигнал, необходимо в выпадающем меню, которое открывается щелчком правой

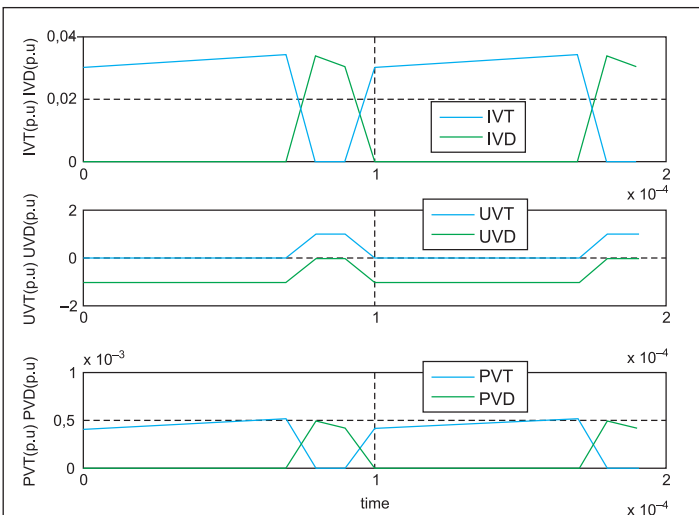


Рис. 6. Электромагнитные процессы импульсного понижающего регулятора постоянного напряжения

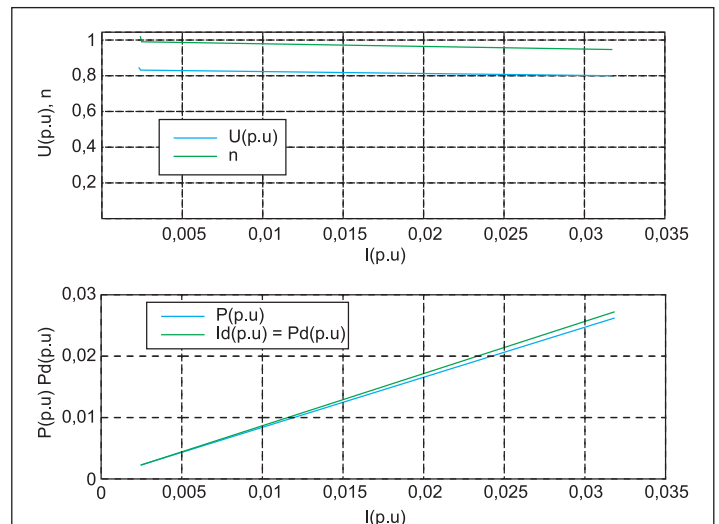


Рис. 7. Внешняя, электромагнитная и энергетические характеристики импульсного понижающего регулятора постоянного напряжения для $\gamma = 0,8$

Листинг 1.

```

Ub=150; r=0.4;
Ib=Ub/r;
t=0:1e-5:19e-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,IVT,t,IVD);%Построение графиков тока
grid on;
ylabel('IVT(p.u) IVD(p.u)');
legend('IVT','IVD','Location','Best');

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

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

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.*I1;%Расчет относительных значений входной мощности
n=P/Pd;
subplot(2,1,1);%Построение электромагнитных характеристик
plot(I,U,I,n,I,0);
grid on;
xlabel('I (p.u)');
ylabel('U (p.u) n');
legend('U (p.u)','n','Location','Best');
subplot(2,1,2);%Построение энергетических характеристик
plot(I,P,I,Pd,I,0);
grid on;
xlabel('I (p.u)');
ylabel('P (p.u) Pd (p.u)');
legend('P (p.u)','Pd(p.u)=Pd (p.u)','Location','Best');
    
```

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 участок анализируемого сигнала, который должен соответствовать квазиустановившемуся режиму работы схе-

Таблица 1. Библиотеки, пиктограммы, параметры блоков и их назначение в модели

Библиотека	Блок	Параметры блока
Sim Power SystemsPower Electronics	 Силовой диод	Resistance R_{on} (Ом) — 0,1, Inductance L_{on} (Гн) — 0, Forward voltage V_f (В) — 1, Initial current I_c (А) — 0, Snubber resistance R_s (Ом) — 1e5, Snubber capacitance C_s -inf
Sim Power SystemsPower Electronics	 Силовой транзистор	Resistance R_{on} (Ом) — 0,1, Inductance L_{on} (Гн) — 0, Forward voltage V_f (В) — 1, Current 10% nail time $T_f(c)$ -1e-6, Current nail time $T_f(c)$ -2e-6, Initial current I_c (А) — 0, Snubber resistance R_s (Ом) — 1e5, Snubber capacitance C_s -inf
Sim Power Systems Elements	 Дроссель	Branch type — R L, Resistance (Ом) — 0,3, Inductance (Гн) — 1e3, Measurements — Branch current
Sim Power SystemsElectrical Source	 Источник питания	Amplitude (В) — 150, Measurements — None
Sim Power Systems Elements	 Конденсатор фильтра и сопротивление нагрузки	C-Branch type — C, Capacitance C(Ф) — 1e-4, Measurements — Branch voltage. R-Branch type — R, Resistance (Ом) — 10, Measurements — Branch current
Sim Power SystemsElectrical Source	 Управляемый источник противоЭДС	Source type — DC, Initial amplitude — 0, Measurements — None
Simulink Source	 Генератор задания противоЭДС	Time values — [0; 0,2; 0,71], Output values — [120; 120; 50]
Simulink Signal Routing	 Ручной переключатель	
Simulink Source	 Блок задания противоЭДС	
Sim Power SystemsMeasurement	 Измеритель напряжения и тока нагрузки	Available Measurements — U_b ; C, I_b ; R. Selected Measurements — U_b ; C, I_b ; R.
Sim Power SystemsExtras LibraryMeasurement	 Вычислитель постоянной составляющей тока питания	Fundamental frequency f(Гц) — 2000, Harmonic n — 0.
SimulinkSinks	 Блок записи квазиустановившихся электромагнитных процессов в рабочее пространство	Variable name — out, Limit data points to last — 5000, Decimation — 10, Sample time — 1e-5, Save format — Array. Variable name — out1, Limit data points to last — 20, Decimation — 1, Sample time — 1e-5, Save format — Array.
SimulinkPort & Subsystem	 Блоки передачи/приема сигнала	
SimulinkSinks	 Цифровой измеритель тока питания, напряжения и тока нагрузки	
SimulinkSignal Routing	 Мультиплексор	Number of inputs 3.
SimulinkSignal Routing	 Селектор сигналов	Signals in the bus: signal1, signal2, signal3. Selected signals: signal1, signal2, signal3.
SimulinkSinks	 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.
SimulinkSource	 Блок задания входного сигнала	
SimulinkSource	 Тактовый генератор несущего пилообразного напряжения	Time values — [0; 0,0001], Output values — [0; 1].
SimulinkMath Operation	 Сумматор	List of signal ±
SimulinkDcontinuous	 Блок реле	Switch on point — 0,01; Switch off point — -0,01; Output when on — 1; Output when off — 0.
SimulinkLogic and Bit Operation	 Блок изменения формата числа	Output date type mode — boolean
SimulinkLogic and Bit Operation	 Блок логического отрицания	Operator — NOT
SimulinkSimulink Extras/Flip Flops	 R-S-Триггер	Initial condition (state of Q) — 0.

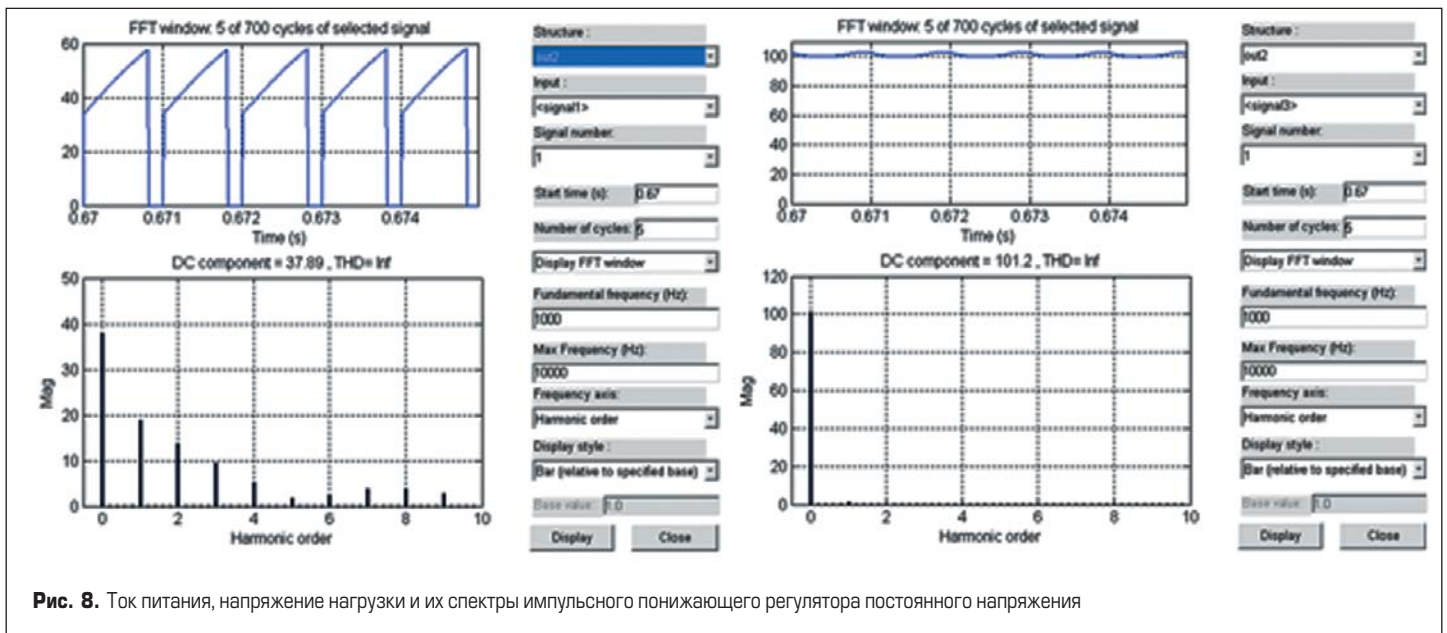


Рис. 8. Ток питания, напряжение нагрузки и их спектры импульсного понижающего регулятора постоянного напряжения

Таблица 2. Возможные алгоритмы управления

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

мы, и просмотреть этот участок в верхнем левом поле окна.

В поле *Fundamental frequency* (Гц) задается основная частота исследуемого сигнала. В поле *Max frequency* (Гц) задается максимальная частота спектра. Выбор этой частоты определяется задачами анализа. Поле *Frequency axis* позволяет по оси абсцисс откладывать частоту 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 показаны на рис. 8.

Основные характеристики импульсного понижающего 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 измене-

ний, значение противоЭДС в блоке (Constant 1) устанавливается равным нулю. 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 моделирования заносятся в таблицу, по данным которой строится регулировочная характеристика $U = f(i_{\gamma})$.

При снятии нагрузочной (внешней), электромагнитных и энергетических характеристик параметры нагрузки R, C остаются без изменений, изменяется противоЭДС от U_d до 0 В каждые $U_d/10$ В. При этом напряжение управления остается максимальным (0,9 В) и постоянным.

Моделирование проводится для каждого значения противоЭДС. Результаты моделирования заносятся в таблицу, по данным которой строятся перечисленные характеристики. В блоке Display (рис. 5) измеряемые величины представлены в следующей последовательности: 1 — средний ток питания; 2 — среднее

напряжение на нагрузке; 3 — средний ток в нагрузке.

Характеристики преобразователя с рассмотренным независимым способом управления, в котором период T задается тактовым генератором в схеме управления, а относительная длительность включенного состояния транзистора γ зависит от входного сигнала, определяют пределы регулирования преобразователя. Однако значения T и γ можно задавать и иными способами.

Возможные алгоритмы управления, реализуемые в системе с рассматриваемым преобразователем, представлены в таблице 2 где $n = 0, 1, 2, \dots$, U^* — заданное выходное напряжение, ΔU^* — заданная пульсация выходного напряжения, $\tau = rC$ — постоянная времени нагрузки.

Как видно из таблицы 2, при алгоритмах управления $T_{-}U^*$ и $U^*_{-}U^*$ γ зависит от переменных состояния. Модели схем управления с алгоритмами $T_{-}U^*$ и $U^*_{-}U^*$ приведены на рис. 9. В первом случае транзистор VT в модели (рис. 5) включается от тактового импульса генератора (Pulse Generator, рис. 9), а выключается в момент, когда напряжение на нагрузке U достигнет заданного значения U^* .

Во втором случае в схеме реализуется скользящий режим относительно заданного напряжения на нагрузке. Электромагнитные и энергетические характеристики преобра-

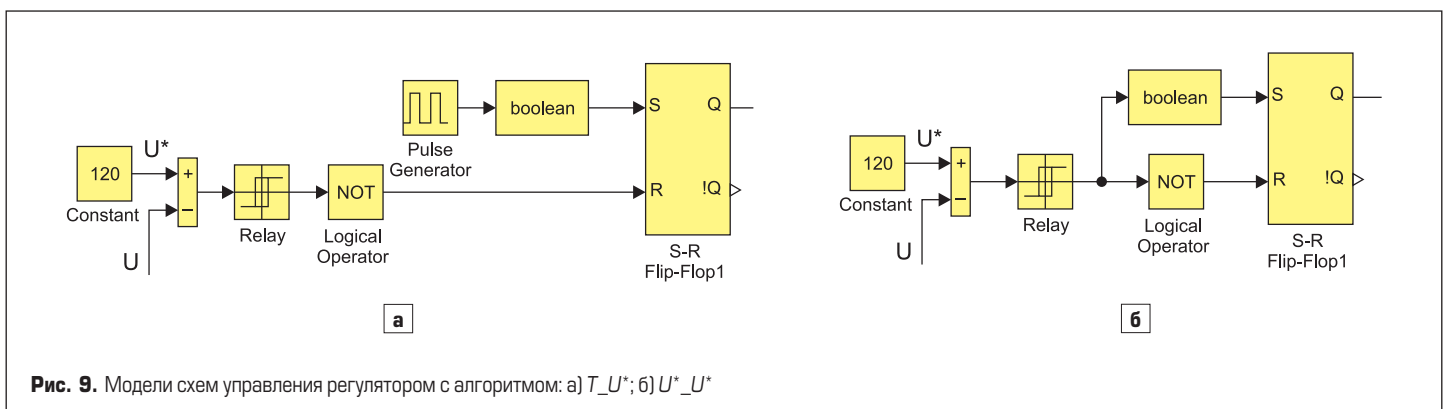


Рис. 9. Модели схем управления регулятором с алгоритмом: а) $T_{-}U^*$; б) $U^*_{-}U^*$

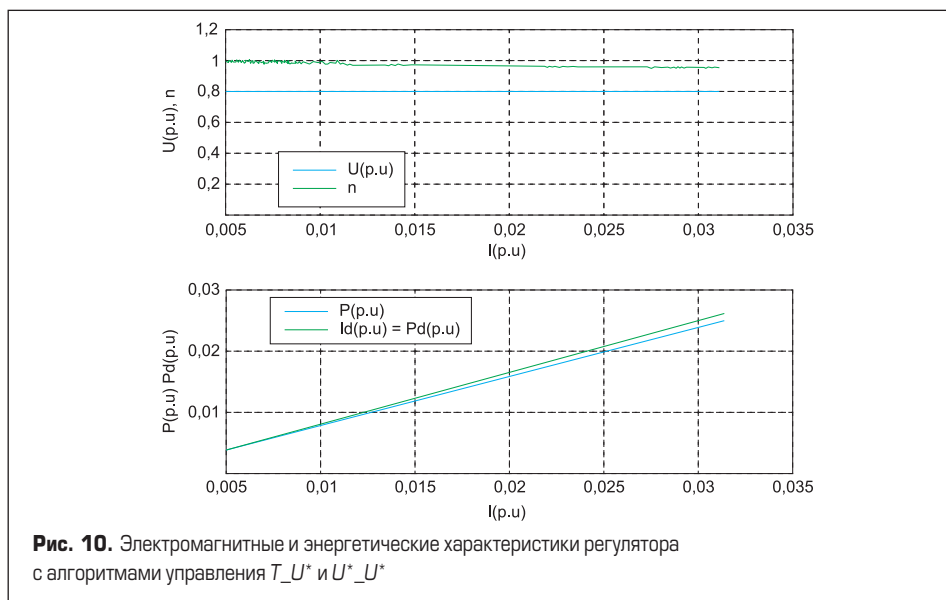


Рис. 10. Электромагнитные и энергетические характеристики регулятора с алгоритмами управления T_U^* и $U^*_U^*$

зователя, полученные на модели, приведены на рис. 10.

При рассмотренном способе управления преобразователь представляет собой стабилизатор напряжения с достаточно хорошими электромагнитными и энергетическими свойствами, что позволяет считать такой способ управления наиболее рациональным при построении стабилизированного источника питания постоянного тока.

Основные характеристики импульсного понижающего регулятора постоянного напряжения с рассмотренными алгоритмами управ-

ления можно получить и «обычным» способом — так, как это описано выше.

Литература

1. Бирзниец 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 System // 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 И. В. Simulink: среда создания инженерных приложений. М.: ДИАЛОГ-МИФИ. 2004.
13. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB Sim Power System Simulink. СПб: ПИТЕР. 2008.