

ШКОЛА MATLAB

Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде MATLAB–Simulink

Урок 15. Исследование однофазного активного выпрямителя

Статья продолжает цикл «ШКОЛА MATLAB» в разделе «Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде MATLAB–Simulink». В данном уроке исследуется однофазный активный выпрямитель с различными алгоритмами управления. Показано, что для достижения высоких энергетических показателей при изменении нагрузки следует управление активным выпрямителем организовать в замкнутой системе.

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

germangalkin@gmail.com

Введение

Основной задачей активного однофазного выпрямителя (AB_1) является преобразование переменного однофазного напряжения питающей сети в постоянное, компенсация искажений потребляемого тока и компенсация фазового сдвига тока сети относительно напряжения сети. По сути, AB_1 выполняет практически ту же функцию, что и ККМ [1], но с использованием других технических средств. Основным показателем энергоэффективности AB_1, как и ККМ, является коэффициент мощности (Power Factor, PF), который определяется отношением активной мощности к полной:

$$PF = P/S.$$

В однофазной сети полная мощность может превышать активную по двум причинам:

- нагрузка имеет активно-реактивный характер;
- нагрузка нелинейна и вызывает появление гармонических составляющих в токе.

Способы и алгоритмы управления AB_1

Принципиальная схема активного однофазного выпрямителя (AB_1) представлена на рис. 1а. Она содержит

однофазный мостовой полупроводниковый коммутатор (ПК), выполненный на четырех транзисторных ключах VT1–VT4 с обратными диодами VD1–VD4. В диагональ моста, образованного транзисторными ключами, включен источник однофазного переменного напряжения с последовательной индуктивностью (дросселем). Активные потери в дросселе и полупроводниковых приборах инвертора, как и ранее [1, 2], учтены сопротивлением r . В цепь постоянного тока включена нагрузка. Она представлена конденсатором фильтра с параллельно включенным резистором. В однофазном мостовом полупроводниковом коммутаторе используются в основном два способа управления силовыми ключами: симметричный и поочередный.

Последовательность образования структур ПК на коммутационных интервалах в течение периода коммутации при симметричном способе переключения показана на рис. 1б, в. В этом случае на нагрузке формируются разнополярные импульсы в течение каждой полуволны модулирующего сигнала.

Последовательность образования структур ПК на коммутационных интервалах в течение периода коммутации при поочередном способе переключения показана на рис. 2а–г. Интервал времени, в течение которого нагрузка подсоединена к сети с помощью диагонально расположенных транзисторов, назовем

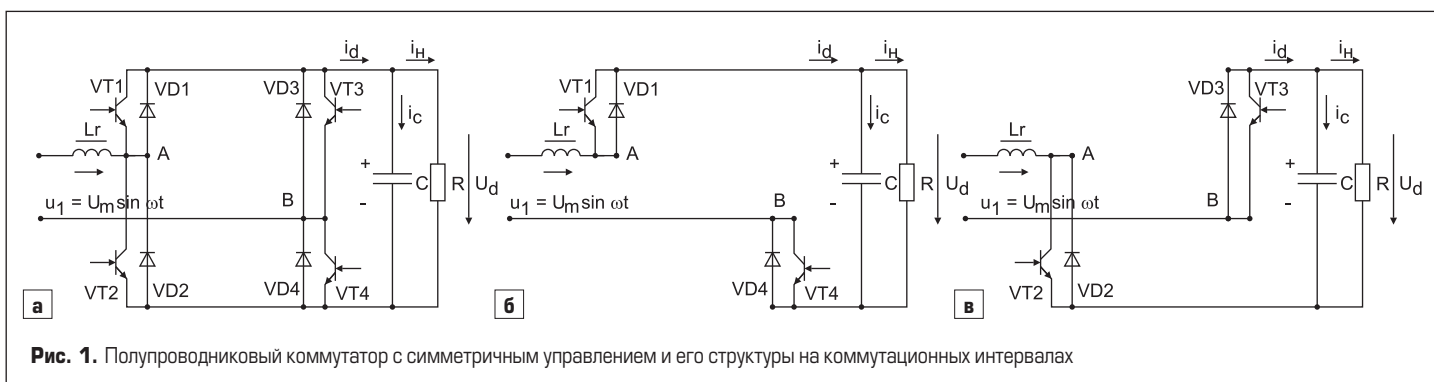


Рис. 1. Полупроводниковый коммутатор с симметричным управлением и его структуры на коммутационных интервалах

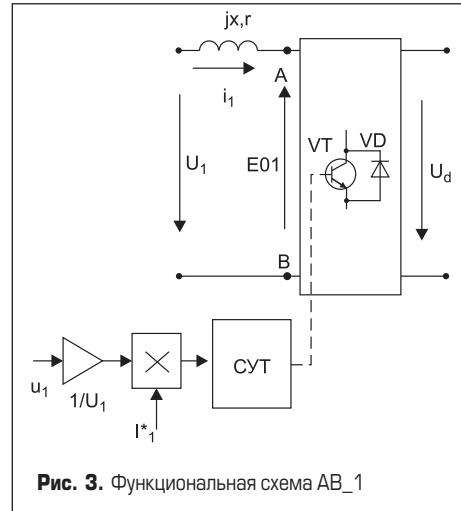
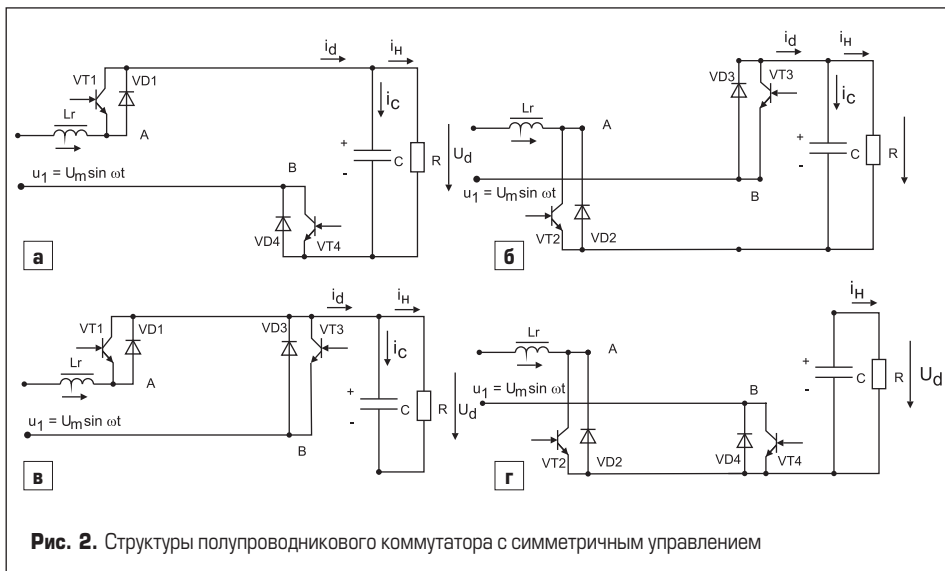


Рис. 3. Функциональная схема АВ_1

импульсом, а интервал времени, когда сеть закорочена на индуктивность с помощью верхних (VT1, VT3) или нижних (VT2, VT4) транзисторов, назовем паузой. При положительной полуволне модулирующего напряжения в течение импульса открыты диагональные транзисторы VT1, VT4 (рис. 2а), а в течение паузы поочередно включаются то верхние по схеме транзисторы VT1, VT3 (рис. 2в), то нижние VT2, VT4 (рис. 2г). При отрицательной полуволне модулирующего напряжения в течение импульса открыты диагональные транзисторы VT3, VT2 (рис. 2б), а в паузе алгоритм переключения транзисторов не изменяется.

Таким образом, при любом знаке входного модулирующего сигнала в состоянии переключения находятся все четыре транзисторных ключа моста. Этим достигаются одинаковые условия работы полупроводниковых приборов в мостовой схеме.

При поочередном способе переключения на нагрузке формируются однополярные импульсы в течение каждой полуволны модулирующего сигнала.

Алгоритмы управления АВ_1 аналогичны тем, которые подробно рассмотрены в [1, 2] применительно к импульсному регулятору постоянного напряжения и корректору коэффициента мощности.

Аналитическое исследование АВ_1

Первоначально рассмотрим независимый алгоритм управления [1, 2], позволяющий оценить физику работы АВ_1 и его предельные возможности. Анализ АВ_1 осуществляется в соответствии с функциональной схемой, показанной на рис. 3.

Первая гармоника ЭДС на зажимах А и В может быть представлена в комплексном виде следующим выражением:

$$\dot{E}_{01} = mU_d e^{j\varphi_m} \quad (1)$$

где U_d — напряжение на нагрузке; φ_m — фаза входного модулирующего синусоидального сигнала по отношению к напряжению сети; m — коэффициент модуляции. Символическое уравнение,

составленное в соответствии со вторым законом Кирхгофа для АВ_1, запишется в виде:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_{01} + r\dot{I}_1 + jx\dot{I}_1, \quad (2)$$

где $x = \omega L = 2\pi f_1 L$ — индуктивное сопротивление дросселя на частоте питающей сети.

Рассмотрим физику работы АВ_1, используя векторную диаграмму в комплексной плоскости. При этом в синхронно вращающейся системе координат обозначим вещественную ось комплексной плоскости через X, а мнимую — через Y. Направим вектор \dot{U}_1 напряжения сети по вещественной оси, тогда

$$\dot{U}_1 = U_x = U_1; \quad U_y = 0.$$

На векторной диаграмме показано, что активный выпрямитель в зависимости от соотношения величин напряжения сети U_1 и ЭДС E_{01} может потреблять из сети положительную (индуктивную) (рис. 4а) либо отрицательную (емкостную) мощность (рис. 4б). Поэтому, изменяя коэффициент модуляции, можно менять коэффициент мощности АВ_1.

В синхронно вращающейся системе координат при совмещении вещественной оси с вектором напряжения сети уравнения (1, 2) запишутся в виде:

$$\begin{aligned} U_1 &= E_x + rI_x - xI_y, \\ 0 &= E_y + rI_y + xI_x, \\ E_x &= mU_d \cos \varphi_m, \\ E_y &= mU_d \sin \varphi_m, \end{aligned} \quad (3)$$

где U_1 — амплитуда фазного напряжения сети; E_x, E_y — амплитуды первых гармоник фазных ЭДС АВ_1.

Для полного описания АВ_1 систему уравнений (3) следует дополнить уравнением энергетического баланса между сетью и нагрузкой и уравнением Кирхгофа для цепи постоянного тока.

$$\begin{aligned} 0,5U_1 I_x &= U_d I_d + 0,5r(I_x^2 + I_y^2), \\ I_d &= U_d / R, \end{aligned} \quad (4)$$

где C, R — емкость конденсатора фильтра и сопротивление нагрузки. Совместное решение уравнений (3, 4) позволяет получить замкнутые аналитические выражения для расчета статических характеристик АВ_1.

Регулировочные характеристики, представляющие зависимости выходного напряжения от коэффициента и фазы модуляции, в установившемся режиме рассчитываются по уравнению:

$$U_d = \frac{mU_1 \frac{R}{2z^2} (r \cos \varphi_m - x \sin \varphi_m)}{1 + m^2 \frac{rR}{2z^2}}, \quad (5)$$

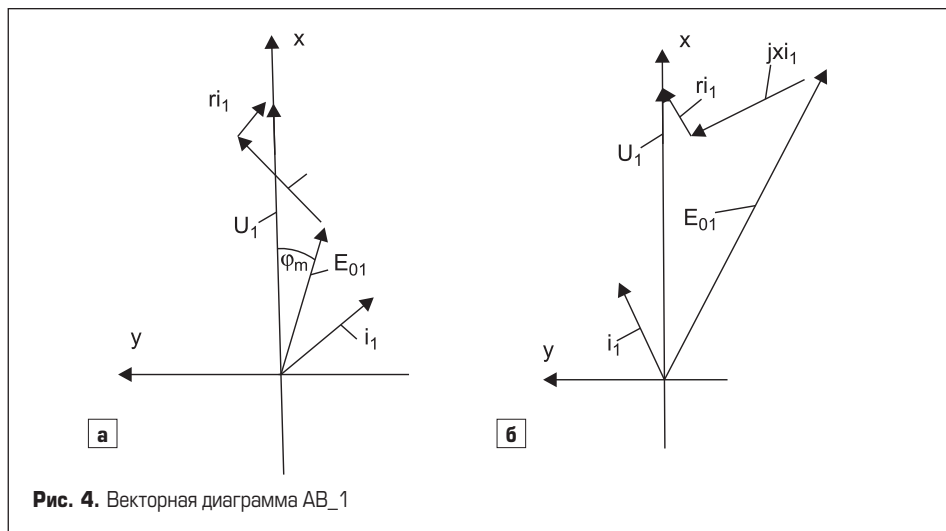
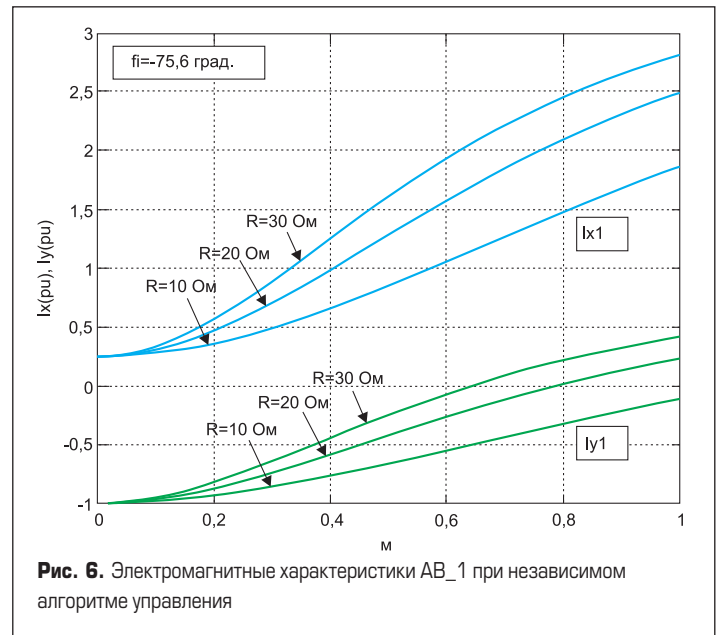
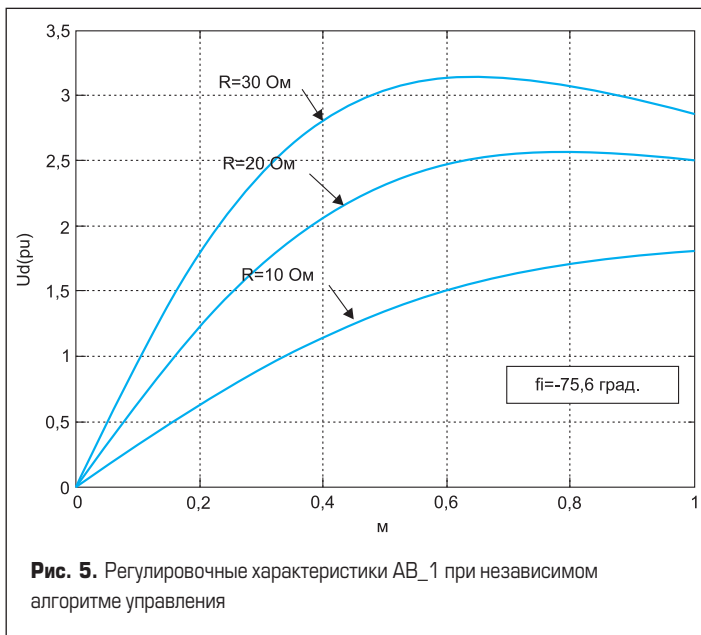


Рис. 4. Векторная диаграмма АВ_1



где $z = \sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}$ — полное сопротивление дросселя в цепи переменного тока.

Токи и мощности АВ_1 рассчитываются по уравнениям:

$$\begin{aligned}
 I_x &= U_1 \frac{r}{z^2} - \frac{mU_d}{z^2} (r \cos \varphi_m + x \sin \varphi_m); \\
 I_y &= -U_1 \frac{x}{z^2} + \frac{mU_d}{z^2} (x \cos \varphi_m - r \sin \varphi_m); \\
 I_1 &= \sqrt{I_x^2 + I_y^2}. \tag{6} \\
 P_1 &= 1/2 U_1 I_x; \\
 Q_1 &= 1/2 U_1 I_y; \\
 S_1 &= \sqrt{P_1^2 + Q_1^2}; \\
 P_d &= U_d^2 / R. \tag{7}
 \end{aligned}$$

При преобразовании уравнений к относительным единицам (per units, pu) в качестве базовых единиц примем $U_b = U_1$, $I_b = U_1/z$, $P_b = U_b I_b$, тогда (5–7) преобразуются к виду:

$$\begin{aligned}
 U_d(pu) &= \frac{m \frac{R}{2z^2} (r \cos \varphi_m - x \sin \varphi_m)}{1 + m^2 \frac{rR}{2z^2}}; \tag{8} \\
 I_x(pu) &= \frac{r}{z} - \frac{mU_d(pu)}{z} (r \cos \varphi_m + x \sin \varphi_m), \\
 I_y(pu) &= -\frac{x}{z} + \frac{mU_d(pu)}{z} (x \cos \varphi_m - r \sin \varphi_m), \\
 I_1(pu) &= \sqrt{I_x^2(pu) + I_y^2(pu)}; \tag{9} \\
 P_1(pu) &= \frac{1}{2} I_x(pu), \\
 Q_1(pu) &= -\frac{1}{2} I_y(pu), \\
 S_1(pu) &= \sqrt{P_1^2(pu) + Q_1^2(pu)}, \\
 P_d(pu) &= \frac{z}{R} U_d^2(pu). \tag{10}
 \end{aligned}$$

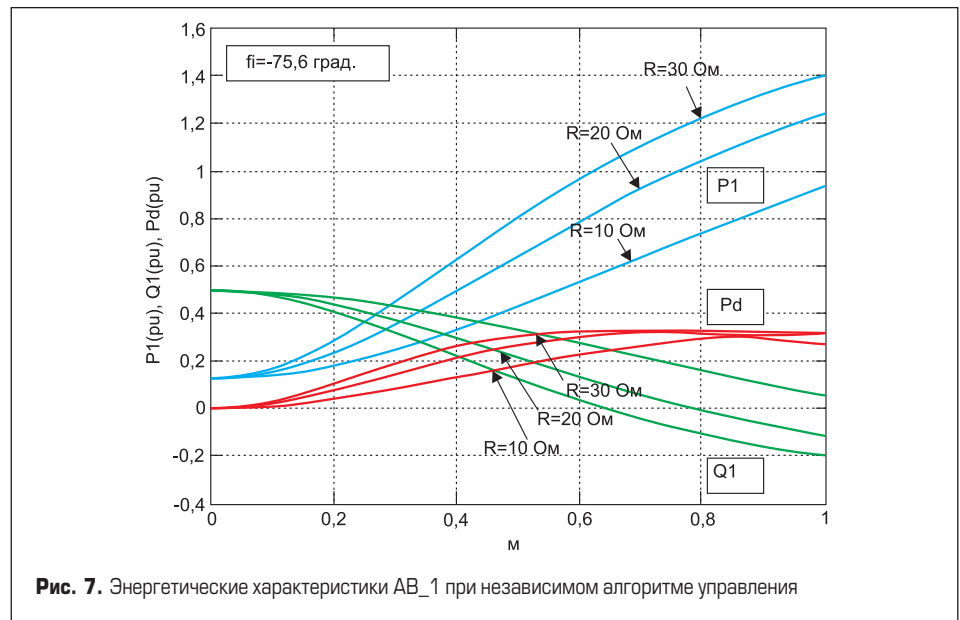
Из уравнения (8) следует, что напряжение на нагрузке при постоянных параметрах АВ_1 зависит как от коэффициента модуляции m , так и от фазы модуляции φ_m . Определим фазу модуляции, при которой напряжение на нагрузке максимально. Для этого возьмем производную от U_d по φ_m и приравняем ее к нулю. Предельная для любого значения сопротивления нагрузки R величина выходного напряжения достигается при единственном значении фазы входного модулирующего синусоидального сигнала по отношению к напряжению сети $\varphi_m = -\arctg x/r$. Для этого значения ниже рассчитаны основные характеристики активного однофазного выпрямителя при следующих параметрах: $r = 0,4$ Ом, $x = 1,57$ Ом, $z = 1,583$ Ом, $U_1 = 310$ В.

Регулировочные характеристики для различных значений сопротивления нагрузки, рассчитанные по уравнению (8), приведены на рис. 5. Из них следует, что предельное напряжение на нагрузке растет с увеличением сопротивления нагрузки R . Коэффициент модуляции m , при котором достигается мак-

симальное предельное значение выходного напряжения, уменьшается с ростом сопротивления нагрузки.

Зависимости активного и реактивного токов, рассчитанные по (9), представлены на рис. 6. Отрицательный реактивный ток является индуктивным (рис. 4). На рис. 6 видно, что условие $PF \approx 1$ соблюдается только при определенных постоянных значениях. Например, для АВ_1 с выбранными параметрами ($r = 0,4$ Ом; $x = 1,57$ Ом; $z = 1,583$ Ом; $U_1 = 310$ В) и с сопротивлением нагрузки $R = 20$ Ом это условие соблюдается при $m = 0,8$ (рис. 6), для напряжения на нагрузке $U_d(pu) = 2,6$.

Зависимости активной и реактивной мощности в питающей сети переменного тока, а также мощности в нагрузке от коэффициента модуляции, рассчитанные по уравнениям (10), приведены на рис. 7. Эти зависимости показывают, что при рассмотренном независимом алгоритме управления АВ_1 имеет достаточно низкий КПД во всем диапазоне изменения коэффициента модуляции.



Виртуальная лабораторная установка АВ_1 при независимом алгоритме управления и ее характеристики

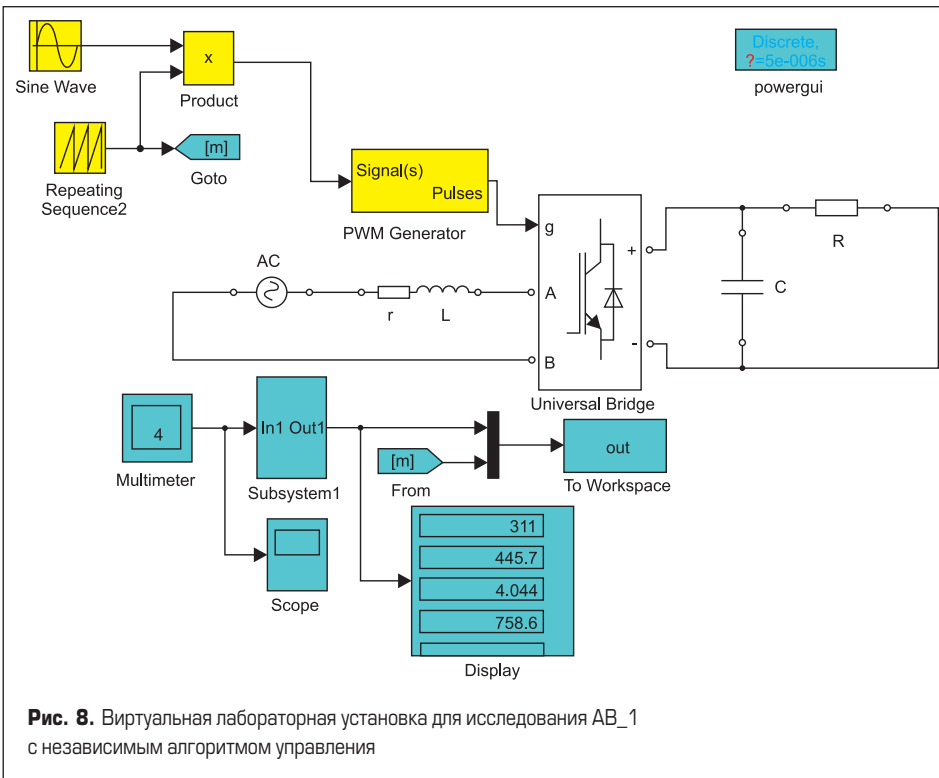


Рис. 8. Виртуальная лабораторная установка для исследования АВ_1 с независимым алгоритмом управления

Виртуальная лабораторная установка для исследования активного однофазного выпрямителя с независимым алгоритмом управления показана на рис. 8. Модель АВ_1 содержит силовые блоки, блоки управления, блоки измерения и блоки передачи сигналов внутри модели и в рабочую область MATLAB. Разработка модели осуществлялась при использовании структурно-функциональных (пакет Simulink) и виртуальных (пакет расширения Sim Power System) блоков. Представление результатов моделирования реализуется программными и инструментальными средствами MATLAB [7]. Время симуляции составляет 2 с, шаг дискретизации Max Step Size = 10^{-4} .

Каждый блок пакетов Simulink и Sim Power System имеет окно настройки основных параметров. Библиотеки основных блоков, составляющих модель, их названия, пиктограммы и параметры приведены в таблице 1.

В блоке Subsystem 1 (рис. 9) последовательно вычисляются:

- амплитуда напряжения сети;
- амплитуда первой гармоники тока сети;
- среднее напряжение на нагрузке;
- средний ток нагрузки.

По проведению симуляции строятся зависимости напряжения на нагрузке и полного тока в сети. Для построения этих зависимостей служит программа, помещенная в листинг 1. Сами характеристики для $R = 20$ Ом представлены на рис. 10. Сравнение этих характеристик с рассчитанными аналитически (рис. 5) показывает их достаточно хорошее совпадение.

Таблица 1. Библиотеки основных блоков, их названия, пиктограммы и параметры

Библиотека	Блок	Параметры блока
Sim Power System\Electrical Source	AC Источник синусоидального напряжения	Peak amplitude (V) — 310 Phase (deg) — 0 Frequency (Hz) — 50 Simple time — 0 Measurements — Voltage
Sim Power System\Power Electronics	Universal Bridge Полупроводниковый коммутатор	Number of bridge arms — 2 Snubber resistance Rs(Ohm) — $1e-5$ Snabbers capacitance Cs-inf Power Electronic devices — IGBT/Diodes Ron(Ohm) — $1e-3$ Forward voltage [1 1] Tf (s), Tt (s) — [$1e-6$, $2e-6$] Measurements — None
Sim Power System\Elements	r L Дроссель	Branch type — R L Resistance (Ohms) — 0.4 Inductance (H) — $5e-3$ Measurements — Branch current
Sim Power System\Elements	C R Конденсатор фильтра и сопротивление нагрузки	Capacitance C (F) — $1e-2$ Measurements — Branch voltage Resistance (Ohms) — 20 Measurements — Branch current
Simulink\Sim Power System\Extras\Control Blocks	PWM Generator	Generator Mode — 2 arm bridge (4-pulses) Carrier frequency (Hz) — 1000
Simulink\Source	Repeating Sequence2 Генератор задания коэффициента модуляции	Time values — [0; 2] Output values — [0; 1]
Simulink\Source	Sine Wave Блок задания модулирующего сигнала	Amplitude — 1 Bias — 0 Frequency (rad/sec) — $2 * \pi * 50$ Phase (rad) — $-75.6 * \pi / 180$
Sim Power System\Measurement	Multimeter Измеритель напряжения и тока	Selected Measurements: Usrc: AC Ib: r L Ub: C Ib: R
Simulink\Sinks	out Блок записи напряжения и тока в рабочую область	Variable name — out Limit data points to last — $2e+4$ Decimation — 10 Sample time — $1e-5$ Save format — Array

Листинг 1

```

r=0.4;x=2*pi*50*(5e-3);
z=sqrt(r^2+x^2);%Параметры АВ_1
Ub=310;Ib=Ub/z;
U1=out(:,1);%Амплитуда напряжения сети
U1pu=U1./Ib;
I1=out(:,2);%Амплитуда тока сети
I1pu=I1./Ib;
fi=out(:,3);
fi1=fi.*pi/180;%Фаза тока сети
Ud=out(:,4);%Напряжение нагрузки
Udpu=U./Ub;
Id=out(:,5);%Ток нагрузки
Idpu=I./Ib;
m=out(:,6);%Коэффициент модуляции
I11pu=I1pu.*cos(fi1);%Активный ток сети
I12pu=I1pu.*sin(fi1);%Реактивный ток сети
S1=U1.*I12; % Мощность в сети
S1pu=S1/(Ub*Ib);
plot(m,Udpu,m,I1pu);
grid on;
xlabel('m');
ylabel('Ud(p.u), I1 (p.u)');
legend('Ud(p.u)', 'I1(p.u)', 'Location', 'Best');
    
```

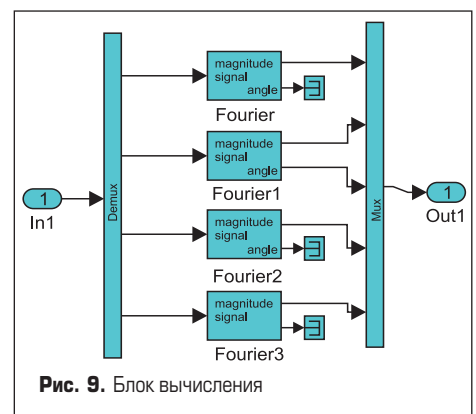
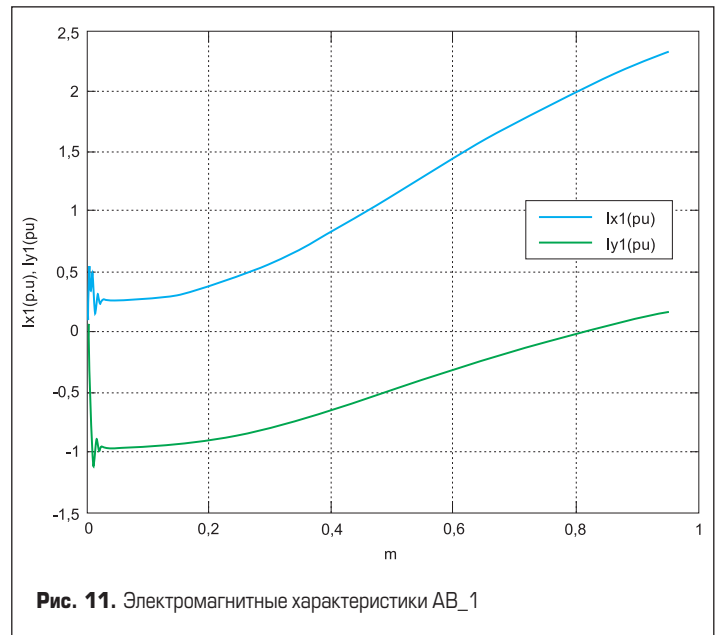
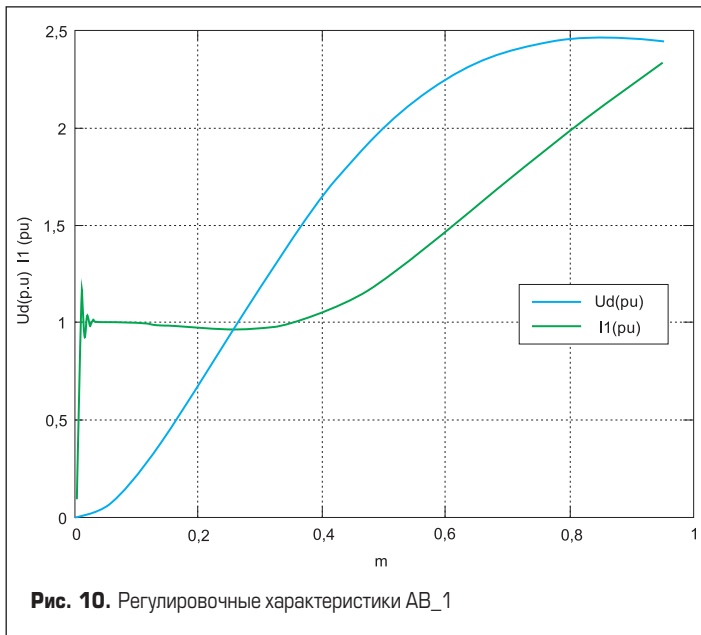


Рис. 9. Блок вычисления



Зависимости относительного активного и реактивного токов и мощностей (см. уравнение 10) строятся программой (листинг 1), в которой построение графиков изменено в соответствии с листингом 2. Эти характеристики представлены на рис. 11.

```

Листинг 2
plot(m,Ix1pu,m,Iy1pu);
grid on;
xlabel('m');
ylabel('Ix1(p.u), Iy1(p.u)');
legend('Ix1(p.u)', 'Iy1(p.u)', 'Location', 'Best');
    
```

Исследования, приведенные выше, свидетельствуют о том, что при независимом алгоритме управления АВ_1 может обеспечить требование $PF = 1$ только при фиксированных значениях коэффициента модуляции, напряжения на нагрузке и сопротивления нагрузки и имеет достаточно низкий КПД во всем диапазоне изменения коэффициента модуляции. Поэтому при построении схемы управления АВ_1, рассчитываемого на работу с изменяющимся сопротивлением нагрузки, приходится отказаться от независимого алгоритма управления.

Для обеспечения $PF = 1$ при изменении сопротивления нагрузки следует использовать скользящее токовое управление (алгоритмы $T_{I_d^*}$ или $I_d^* - I_d^*$ «токовый коридор» [1, 2]). В этом случае заданный ток в сети в определенном масштабе должен повторять форму напряжения сети. Формирование заданного тока в сети показано на рис. 3. Здесь напряжение сети делится на амплитуду напряжения сети и затем умножается на заданный ток. В результате на входе системы управления (СУТ) заданный ток сети будет синусоидальным, совпадающим по фазе с напряжением сети.

В синхронно вращающейся системе координат (x — вещественная ось, y — мнимая) при совмещении вещественной оси с вектором напряжения сети токи в сети при $PF = 1$ определяются из уравнения:

$$\dot{I}_1 = I_{x1} - I_1; I_{y1} = 0.$$

При введении базовых и относительных единиц $U(pu) = U/U_b; I(pu) = I/I_b; U_b = U_1; I_b = U_b/z; z = \sqrt{r^2 + x^2}$ уравнение баланса мощности для АВ_1 в относительных единицах запишется в виде:

$$U_d(pu) \times I_d(pu) = \frac{1}{2} \left(I_1(pu) - \frac{r}{z} I_1^2(pu) \right). \quad (11)$$

По уравнению (11) строятся внешние (нагрузочные) характеристики активного выпрямителя.

Семейство нагрузочных характеристик представляет собой зависимости напряжения нагрузки от тока в нагрузке при различных заданных токах в сети питания. Эти зависимости представлены на рис. 12, они являются гиперболическими и расположены тем выше, чем больше заданный ток сети.

Если АВ_1 строится так, чтобы одновременно с поддержанием коэффициента

мощности близким к единице он выполнял бы еще и функцию стабилизатора выходного напряжения, то электромагнитные характеристики АВ_1 при различных значениях заданного напряжения на выходе строятся по уравнению:

$$I_d(pu) = \frac{\frac{1}{2} I_1(pu) - \frac{r}{2z} I_1^2(pu)}{U_d(pu)}. \quad (12)$$

Эти характеристики показаны на рис. 13.

Виртуальная лабораторная установка АВ_1 со скользящим токовым алгоритмом управления и ее характеристики

Виртуальная лабораторная установка для исследования активного однофазного выпрямителя с токовым управлением и стабилизацией выходного напряжения показана на рис. 14.

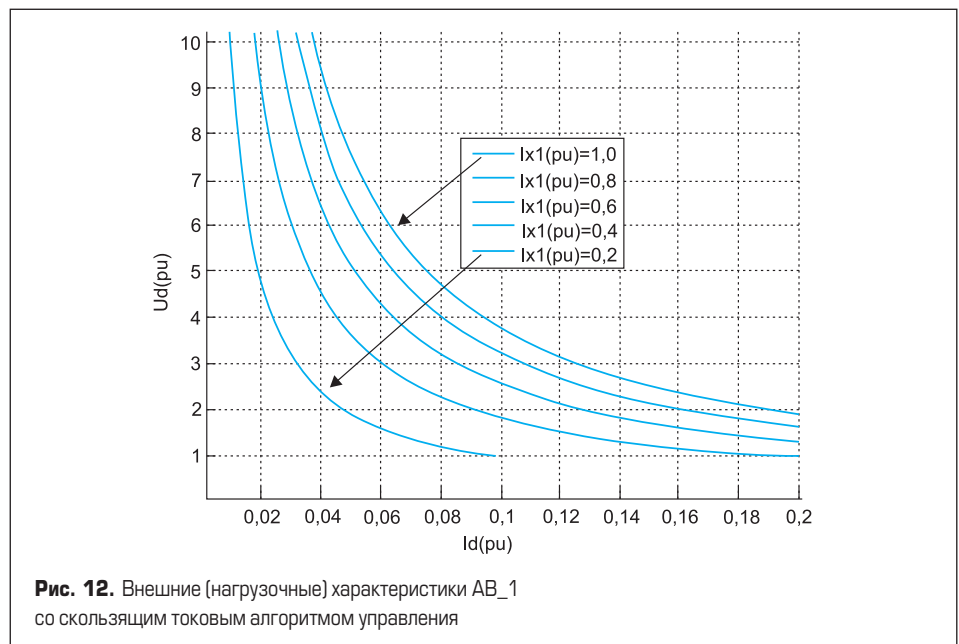


Рис. 12. Внешние (нагрузочные) характеристики АВ_1 со скользящим токовым алгоритмом управления

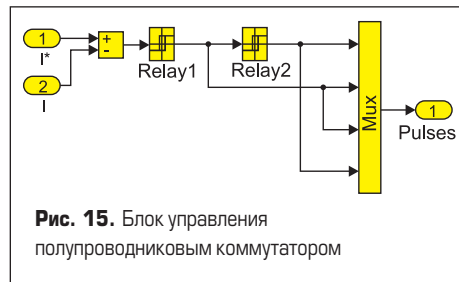
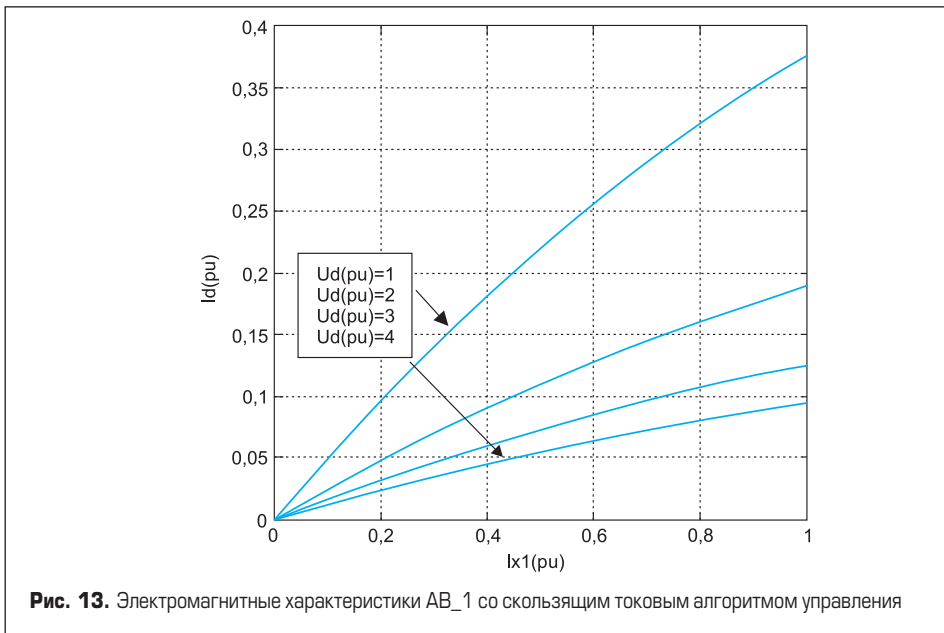


Рис. 15. Блок управления полупроводниковым коммутатором

в блоке Repeating Sequence1 формируется линейно изменяющийся сигнал.

При этом скорость изменения сигнала подбирается достаточно низкой, чем и достигается установившийся режим работы преобразователя при различном токе нагрузки.

Для построения электромагнитных и энергетических характеристик служит программа, помещенная в листинге 3.

Время симуляции равно 0,7 с, шаг дискретизации — Max Step Size = 1e-5. Каждый блок пакетов Simulink и Sim Power System имеет окно настройки основных параметров. Модель АВ_1 содержит силовые блоки, блоки управления, блоки измерения и блоки передачи сигналов внутри модели и в рабочую область MATLAB. В системе управления реализован алгоритм $I_d^* - I_d$ [1, 2].

В блоке Sine Wave задается фаза потребляемого из сети тока относительно сетевого напряжения. В блоке Hist_Control (рис.5) реализован симметричный способ управления полупроводниковым коммутатором; мгновенные значения напряжения и тока в сети, а также напряжения и тока нагруз-

ки измеряются блоком Multimeter. В блоке Subsystem 1 вычисляются:

- амплитуда напряжения сети;
- амплитуда тока сети;
- среднее напряжение нагрузки;
- средний ток нагрузки.

Библиотеки блоков, отличающих эту модель от предыдущей (рис. 8), их названия, пиктограммы и параметры приведены в таблице 2.

Релейный контур тока подчинен контуру стабилизации напряжения с ПИД-регулятором. Для получения электромагнитных и энергетических характеристик во всем диапазоне изменения тока нагрузки преобразователя в модели переключатель Manual Switch устанавливается в нижнее положение,

Листинг 3

```
%Параметры
r=0.4;x=2*pi*50*(5e-3);
z=sqrt(r^2+x^2);
Ub=310;Ib=Ub/z;
U1=out(:,1);%Амплитуда напряжения сети
U1pu=U1./Ib;
I1=out(:,2);%Амплитуда тока сети
I1pu=I1./Ib;
Ud=out(:,3);%Напряжение нагрузки
Udpu=Ud./Ub;
Id=out(:,4);%Ток нагрузки
Idpu=I./Ib;
P1=U1.*I1/2;% Мощность в сети
P1pu=P1./(Ub.*Ib);
Pd=Id.*Ud;%Мощность нагрузки
Pdpu=Pd./(Ub.*Ib);
subplot(2,1,1);
plot(I1pu,Udpu,Idpu,I1pu);
grid on;
xlabel('Id(p.u)');
ylabel('Ud(p.u), I1 (pu)');
legend('Ud(p.u)', 'I1 (pu)', 'Location', 'Best');
subplot(2,1,2);
plot(I1pu,Pdpu,Idpu,P1pu);
grid on;
xlabel('Id(p.u)');
ylabel('Pd(p.u), P1 (pu)');
legend('Pd(p.u)', 'P1(p.u)', 'Location', 'Best');
```

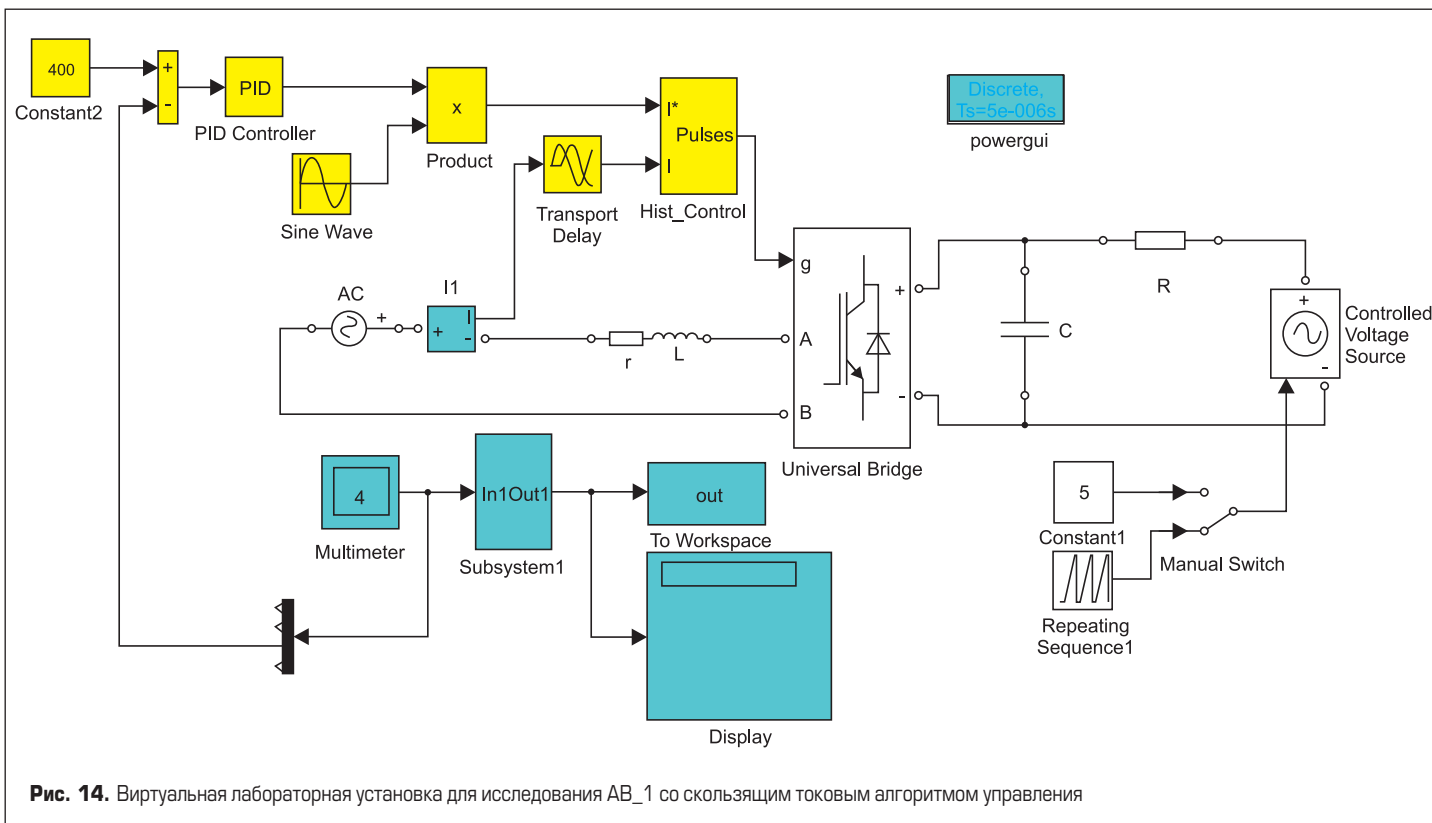


Рис. 14. Виртуальная лабораторная установка для исследования АВ_1 со скользящим токовым алгоритмом управления

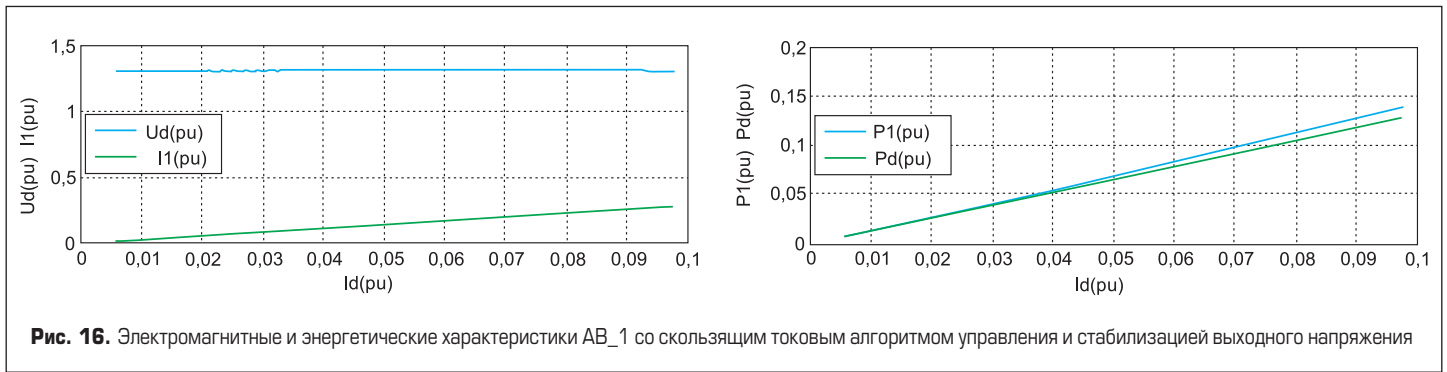


Рис. 16. Электромагнитные и энергетические характеристики АВ_1 со скользящим токовым алгоритмом управления и стабилизацией выходного напряжения

Таблица 2. Библиотеки блоков, отличающих модель, их названия, пиктограммы и параметры

Библиотека	Блок	Параметры блока
Sim Power Systems\Electrical Source	Controlled Voltage Source Управляемый источник противоЭДС	Source type — DC Initial amplitude — 0 Measurements — None
Simulink\Source	Repeating Sequence1 Генератор задания противоЭДС	Time values — [0 0.2 0.71] Output values — [50 50 1200]
Simulink\Signal Routing	Manual Switch Ручной переключатель	
Simulink\Source	Constant1 Блок задания противоЭДС	
Simulink\Source	Sine Wave Блок задания модулирующего сигнала	Amplitude — 1 Bias — 0 Frequency (rad/sec) — $2 * \pi * 50$ Phase (rad) — 0
Simulink\	PID Controller Регулятор напряжения	Proportional — 0.5 Integral — 20 Derivative — 0
Simulink\Math Operation	Sum Сумматор	List of signal ±
Simulink\Discontinuous	Relay1 Блок реле	Relay 1: Switch on point — 0.001 Switch off point — 0.001 Output when on — 1 Output when off — 0 Relay 2: Switch on point — 1 Switch off point — 0 Output when on — 0 Output when off — 1

Электромагнитные и энергетические характеристики АВ_1 со скользящим токовым алгоритмом управления и стабилизацией выходного напряжения приведены на рис. 16. Мгновенные значения напряжения и тока в питающей сети и тока в нагрузке показаны на рис. 17. Гармонический состав тока в питающей сети представлен рис. 18.

Результаты модельного исследования АВ_1 со скользящим токовым алгоритмом управления и стабилизацией выходного напряжения показали, что во всем диапазоне изменения тока нагрузки напряжение на выходе остается неизменным, равным заданному, коэффициент мощности — постоянным ($PF = 1$), а КПД достаточно высоким ($\eta = 0,95-0,98$).

Заключение

Материал, представленный в данном уроке, как и во всех предыдущих, позволяет использовать разработанные виртуальные лабораторные установки для всестороннего исследования однофазного активного выпрямителя. Совпадение результатов теоретического анализа и модельного эксперимента является доказательством адекватности модели. Дальнейшие исследования АВ_1 могут касаться переходных процессов при включении и выключении, набросе и сбросе нагрузки, квазиустановившихся и переходных процессов в полупроводниковых приборах. Все эти и многие другие задачи могут быть решены путем расширения методик измерения и представления результатов, подробно описанных в цитируемой литературе [3–8].

Литература

- Герман-Галкин С. Г. ШКОЛА MATLAB. Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде MATLAB-Simulink. Урок 14. Анализ, расчет и исследование корректора коэффициента мощности // Силовая электроника. 2011. № 4.
- Герман-Галкин С. Г. Школа MATLAB. Урок 12. Исследование импульсного повышающего регулятора постоянного напряжения // Силовая электроника. 2010. № 1.
- Дьяконов В. Многовариантное моделирование силовых устройств в MATLAB+Simulink // Силовая электроника. 2011. № 1.
- Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники. Ч. 2. Новосибирск. 2000.

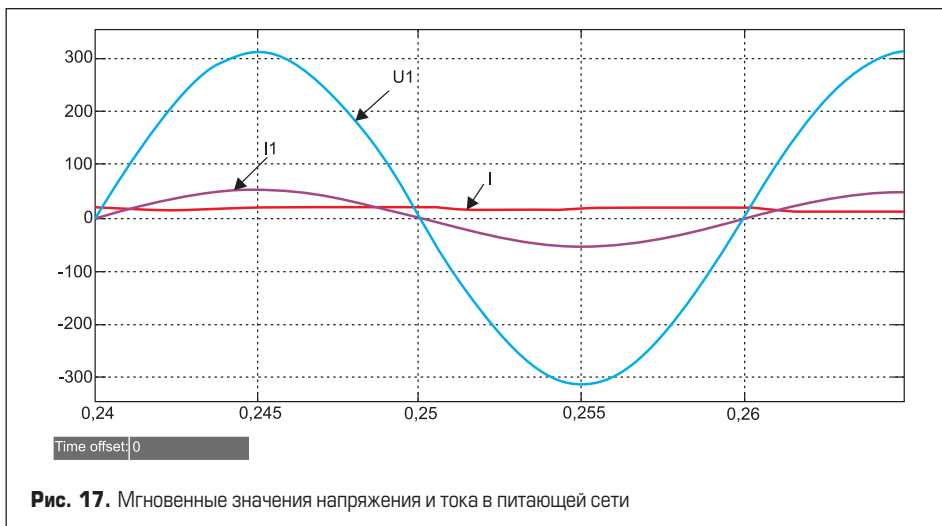


Рис. 17. Мгновенные значения напряжения и тока в питающей сети

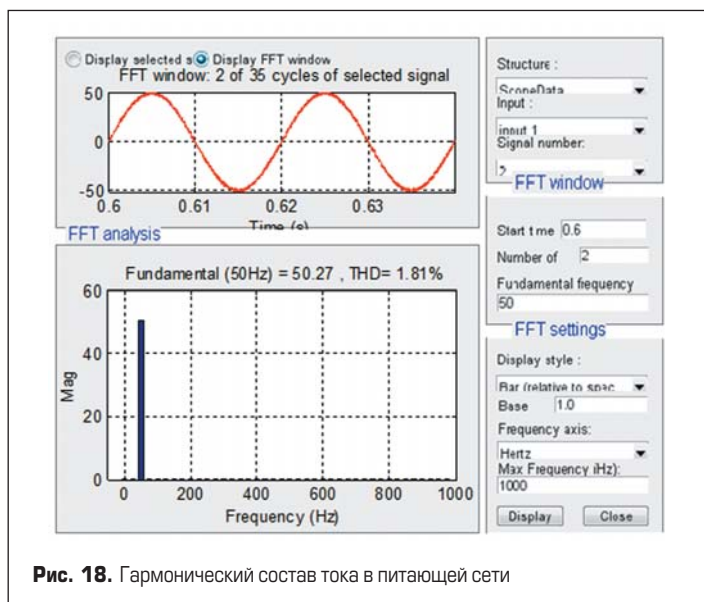


Рис. 18. Гармонический состав тока в питающей сети

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. И. В. Черных. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB Sim Power System Simulink. СПб: ПИТЕР. 2008.
8. Чаплыгин Е. Е., Калугин Н. Г. Теория мощности в силовой электронике. Уч. пособие для студентов, обучающихся по специальности «Промышленная электроника». М. 2006.