

# Школа MATLAB

## Моделирование устройств силовой электроники Урок 10. Вторичный источник питания полупроводникового электропривода с рекуперацией энергии в сеть

Данная статья продолжает цикл публикаций по разработке методики модельного исследования вторичных источников питания (ВИП) силовых полупроводниковых преобразователей, включенных в замкнутую систему электропривода. В статье рассматривается электропривод, ВИП которого обеспечивает рекуперацию энергии в сеть переменного тока.

Для моделирования используются блоки библиотек Simulink и SimPowerSystems (уроки 1–5) [5–9]. Представление результатов моделирования реализуется программными и инструментальными средствами MATLAB (урок 6) [2]. Основные характеристики устройств силовой электроники рассмотрены в уроке 7 [3].

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

ggsg@yandex.ru

### Введение

В предыдущей статье [4] показано, что в электроприводе постоянного тока с широтно-импульсным преобразователем (ШИП), выполняющим функцию силового регулятора, и выпрямителем с емкостным фильтром, выполняющим функцию вторичного источника питания (ВИП), энергетические процессы в ВИП зависят от структуры и параметров замкнутого электропривода.

В частности, в одноконтурном электроприводе, работающем в генераторном режиме, механическая энергия вала накапливается в конденсаторе фильтра либо рассеивается в специальной цепи сброса энергии. Аналогично ведут себя системы переменного тока с автономным инвертором напряжения (АИН) в качестве силового полупроводникового преобразователя.

В системах маломощных (приблизительно до 500 Вт) отмеченные особенности обычно не приводят к существенным ухудшениям энергетических характеристик.

В системах большей мощности применение в ВИП выпрямителя, даже снабженного цепью сброса энергии, не обеспечивает генераторного режима работы как при переходных процессах, так и, тем более, в установившихся режимах работы. Универсальное решение для обеспечения всех режимов работы исполнительный машины в электроприводе и улучшения энергетических характеристик систем реализуется путем использования сетевого инвертора. Основное достоинство сетевого инвертора в системе электропривода — это его способность рекуперировать энергию в сеть переменного тока.

### Расчетная схема подсистемы электропривода «сеть — вторичный источник питания — силовой полупроводниковый преобразователь — электрическая машина»

В значительном числе применений первичным источником питания в электроприводе является сеть переменного тока. В этом случае широтно-импульсные преобразователи и автономные инверторы (ШИП, АИН) запитываются от вторичных источников питания (ВИП). К этим ВИП, кроме обычных требований, предъявляются специфические требования, которые обусловлены необходимостью управлять запасенной (иногда генерируемой) механической системой кинетической или потенциальной энергией.

Полупроводниковые преобразователи со звеном постоянного тока (ШИП, АИН) с широтно-импульсными алгоритмами управления обладают способностью передавать энергию как от звена постоянного тока к исполнительной машине, так

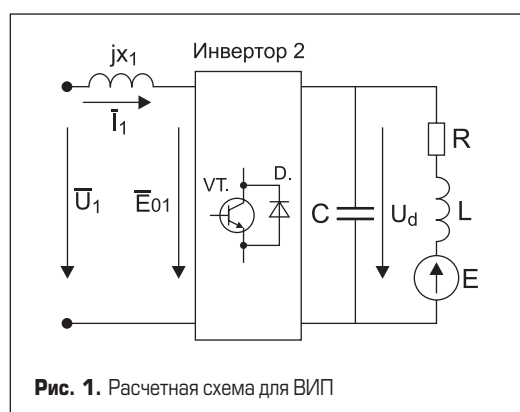


Рис. 1. Расчетная схема для ВИП

и от машины к звену постоянного тока, то есть такие преобразователи обладают двусторонней управляемой энергетической связью. Для реализации двусторонней энергетической связи между звеном постоянного тока и сетью используется, как это было отмечено выше, сетевой инвертор.

Расчетная схема подсистемы, включающая вторичный источник питания и силовой преобразователь с электрической машиной, представлена на рис. 1.

В этой схеме силовой преобразователь вместе с машиной приведен к звену постоянного тока и заменен пассивной R, L нагрузкой и управляемым источником ЭДС E. Такая замена справедлива и для систем постоянного тока с ШИП, и для систем переменного тока с АИН. На выходе ВИП всегда включается конденсатор фильтра. Дифференциальное уравнение для определения тока нагрузки имеет вид:

$$L(di_H/dt) + Ri_H = U_d - E(t). \quad (1)$$

Если электрическая машина, включенная на выходе преобразователя, работает в двигательном режиме, то напряжение  $U_d$  на конденсаторе фильтра превышает противо-ЭДС  $E(t)$  и ток в нагрузке положительный, а энергия направлена от сети к машине. Если электрическая машина, включенная на выходе преобразователя, работает в генераторном режиме, то противо-ЭДС  $E(t)$  превышает напряжение  $U_d$  на конденсаторе фильтра, ток в нагрузке отрицательный, а энергия направлена от машины к сети. Полупроводниковый преобразователь ВИП в этом случае должен создавать пути для протекания отрицательного тока нагрузки во избежание нарастания напряжения на конденсаторе выше допустимого. Динамика электропривода в уравнении (1) определяет поведение противо-ЭДС  $E(t)$ . Однако для энергетических характеристик преобладают установившиеся процессы. Другими словами, если в установившихся режимах (двигательном или генераторном) ВИП обеспечивает передачу энергии между источником переменного тока и исполнительной электрической машиной, то и в переходных режимах работы электропривода двусторонняя передача энергии будет обеспечена, а напряжение на конденсаторе не изменится.

**Преобразование координат**

Описания электромагнитных процессов в трехфазных системах переменного тока значительно упрощаются при использовании метода результирующего вектора [3, 4].

Результирующий вектор напряжения питающей сети находится из уравнения:

$$\bar{U}_1 = 2/3(u_A + \bar{a}u_B + \bar{a}^2u_C) = U_m \exp(j\omega_1 t). \quad (2)$$

Величины, входящие в уравнение, определяются из выражений:

$$\begin{aligned} u_A &= U_m \sin(\omega_1 t); u_B = U_m \sin(\omega_1 t - 2\pi/3); \\ u_C &= U_m \sin(\omega_1 t + 2\pi/3); \\ \bar{a} &= \exp(-j2\pi/3); \bar{a}^2 = \exp(j2\pi/3). \end{aligned} \quad (3)$$

Согласно уравнению (2), результирующий вектор напряжения сети вращается в комплексной плоскости с угловой скоростью  $\omega_1 = 2\pi f_1$ .

Результирующий вектор напряжения сети может быть представлен в следующих декартовых системах координат:

1. В неподвижных координатах, которые обозначаются через  $\alpha$  и  $\beta$ , причем ось  $\alpha$  совмещается с действительной осью комплексной плоскости, а ось  $\beta$  — с мнимой.
2. Во вращающейся с синхронной скоростью  $\omega_1 = 2\pi f_1$  системе координаты —  $x, y$  ( $x$  — вещественная ось,  $y$  — мнимая ось).

Рассмотрим взаимное преобразование результирующего вектора в рассмотренных системах координат.

Математическая основа преобразования поясняется на рис. 2.

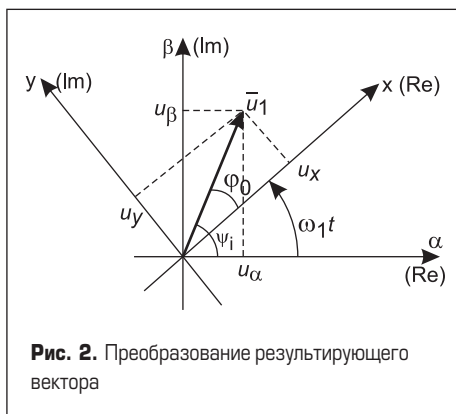


Рис. 2. Преобразование результирующего вектора

В неподвижной системе координат ( $\alpha, \beta$ ) вектор напряжения может быть представлен в алгебраической и показательной форме:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{1H} &= U \exp(j\Psi_1) = \\ &= U_m \exp(j\omega_1 t + \varphi_0) = u_\alpha + j u_\beta. \end{aligned} \quad (4)$$

Аналогично в системе вращающихся координат ( $x, y$ ) тот же самый вектор может быть представлен в виде:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{1Bp} &= \bar{U}_{1H} \exp(-j\omega_1 t) = \\ &= U_m \exp(j\Psi_1 - j\omega_1 t) = U_m \exp(j\varphi_0) = u_x + j u_y. \end{aligned} \quad (5)$$

Отсюда легко получить уравнения перехода от неподвижной системы координат ( $\alpha, \beta$ ) к вращающейся ( $x, y$ ) и наоборот:

$$\begin{aligned} u_x &= u_\alpha \cos(\omega_1 t) + u_\beta \sin(\omega_1 t); \\ u_y &= u_\beta \cos(\omega_1 t) - u_\alpha \sin(\omega_1 t); \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} u_\alpha &= u_x \cos(\omega_1 t) - u_y \sin(\omega_1 t); \\ u_\beta &= u_y \cos(\omega_1 t) + u_x \sin(\omega_1 t). \end{aligned} \quad (7)$$

Преобразование двухфазной неподвижной системы координат в трехфазную осуществляется в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned} u_A &= u_\alpha; u_B = -0,5u_\alpha - \sqrt{0,865}u_\beta; \\ u_C &= -0,5u_\alpha + \sqrt{0,865}u_\beta. \end{aligned} \quad (8)$$

Аналогичные преобразования осуществляются для трехфазного тока в источнике питания и первой гармоники ЭДС на выходе трехфазного инвертора.

При анализе и синтезе трехфазных систем переменного тока преобразование координат реализуется аппаратными и программными средствами в системе управления.

Рассмотрим электромагнитные и энергетические процессы в инверторе (рис. 1), подключенном к питающей сети в синхронно вращающейся системе координат  $x, y$ . Здесь инвертор с одной стороны подключен к сети с напряжением  $U_1$ , с другой — к цепи с напряжением  $U_d$ . Принципиальным свойством этой схемы является постоянство величины напряжения сети  $U_1$ .

Сам инвертор представлен преобразователем, который по отношению к сети переменного тока генерирует результирующий вектор ЭДС, первая гармоника этой ЭДС равна:

$$\bar{E}_{01} = \mu_1 U_d e^{j\varphi_{1mod}}, \quad (9)$$

где  $\mu_1$  — коэффициент модуляции,  $\varphi_{1mod}$  — фаза напряжения модуляции по отношению к напряжению сети.

Уравнение, составленное по второму закону Кирхгофа, для схемы (рис. 1) запишется в виде

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_{01} + jx_1 \bar{I}_1, \quad (10)$$

где  $\bar{E}_{01}, \bar{U}_1, \bar{I}_1$  — результирующие векторы ЭДС на выходе инвертора, напряжения и тока сети.

По отношению к сети переменного тока инвертор может работать и как генератор активной мощности (инвертор), и как потребитель активной мощности (активный вы-

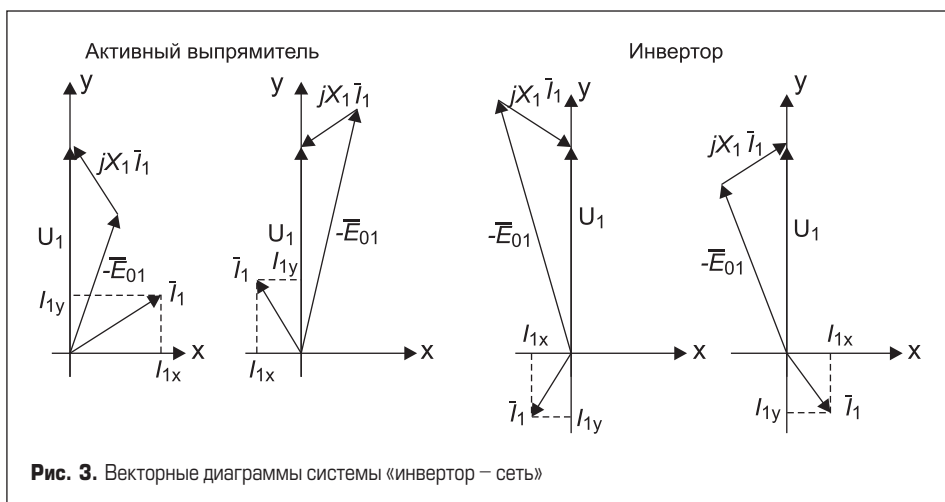


Рис. 3. Векторные диаграммы системы «инвертор – сеть»

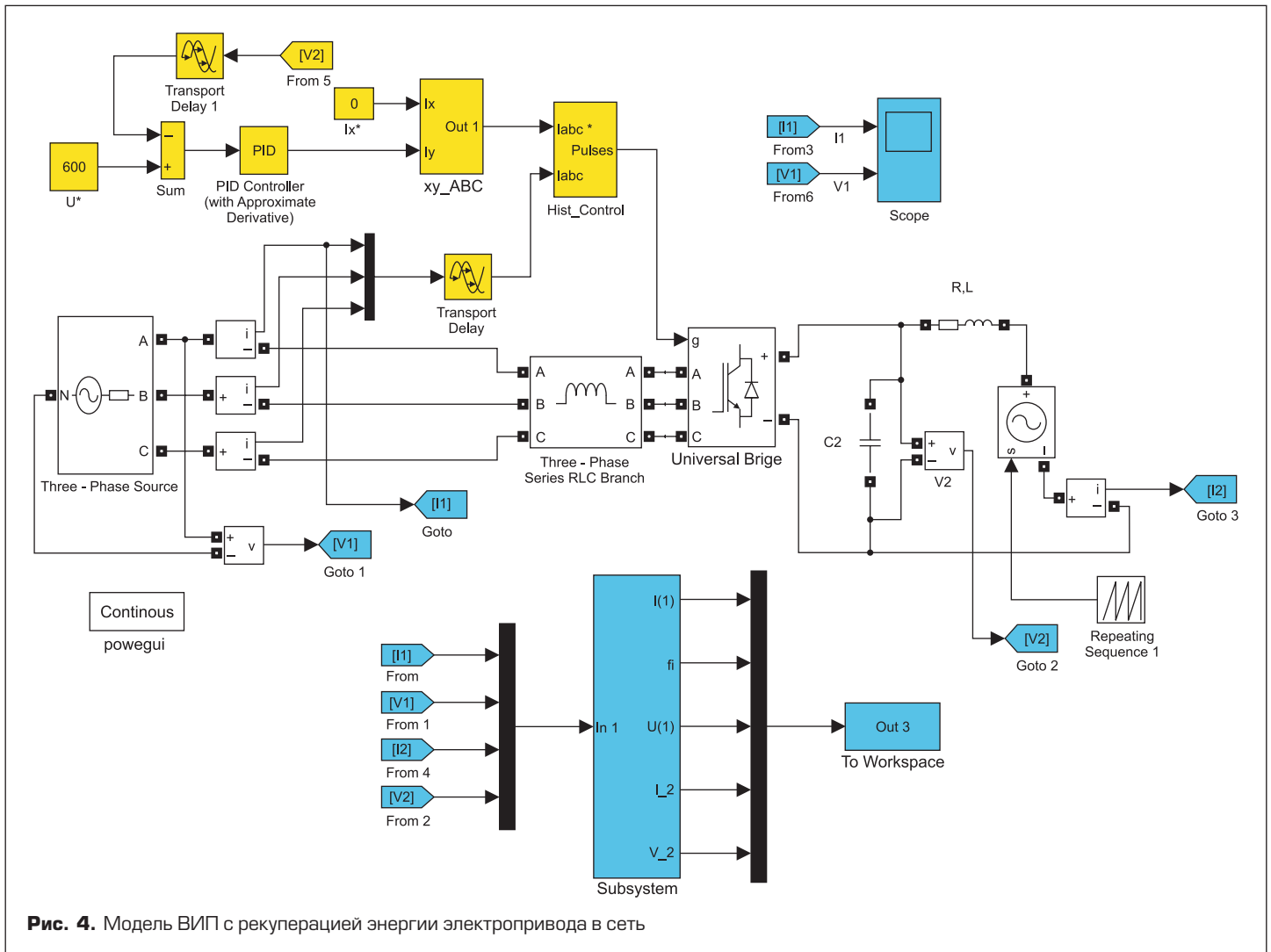


Рис. 4. Модель ВИП с рекуперацией энергии электропривода в сеть

прямитель). При этом активная мощность в сети определяется уравнением:

$$P_1 = -((m_1 U_1 E_{01}) / 2x_1) \sin \varphi_{1mod} = -((m_1 U_1 \mu_1 U_d) / 2x_1) \sin \varphi_{1mod} \quad (11)$$

где  $x_1 = 2\pi f_1 L_1$ ,  $L_1$  — индуктивность на входе инвертора,  $m_1$  — число фаз.

Из уравнения (11) следует, что при  $\varphi_{1mod} \geq 0$  инвертор генерирует в сеть активную мощность. При  $\varphi_{1mod} \leq 0$  инвертор потребляет из сети актив-

ную мощность. При  $\varphi_{1mod} = 0$  вся система работает в режиме холостого хода.

Реактивная мощность, потребляемая инвертором, определяется уравнением:

$$Q_1 = -(m_1 U_1 E_{01} / 2x_1) (\cos \varphi_{1mod} - U_1 / E_{01}) = -(m_1 U_1 \mu_1 U_d / 2x_1) (\cos \varphi_{1mod} - U_1 / \mu_1 U_d). \quad (12)$$

В зависимости от знака в скобках (12) инвертор может потреблять реактивную (индуктивную) или реактивную (емкостную) мощность.

Векторные диаграммы всех возможных режимов работы системы представлены на рис. 3. На векторных диаграммах в качестве базового вектора принят результирующий вектор напряжения сети  $\vec{U}_1 = 2/3(u_A + a u_B + a^2 u_C)$ , направленный по оси  $y$ .

Рассмотрим векторные диаграммы, показанные на рис. 3.

Активная и реактивная мощность в системе определяются уравнениями:

$$P_1 = 1,5 U_1 I_1 \cos \varphi = 1,5 U_1 I_{1Y}, \\ Q_1 = 1,5 U_1 I_1 \sin \varphi = 1,5 U_1 I_{1X}. \quad (13)$$

Если  $I_{1Y} < 0$ , то инвертор генерирует активную мощность в сеть (инвертор). Если  $I_{1Y} > 0$ , то инвертор потребляет активную мощность из сети (активный выпрямитель).

В обоих режимах работы инвертор потребляет из сети реактивную (емкостную) мощность до тех пор, пока  $I_{1X} < 0$ . При  $I_{1X} > 0$  инвертор потребляет из сети реактивную (индуктивную) мощность.

Таким образом, для отдельного, независимого регулирования активной и реактивной мощности необходимо организовать векторное управление инвертором с отрицательной обратной связью по току в синхронно вращающейся системе координат  $(x, y)$ , связанной с результирующим вектором напряжения сети, тогда проекция тока  $I_{1Y}$  определит активную мощность сети, а проекция  $I_{1X}$  — реактивную.

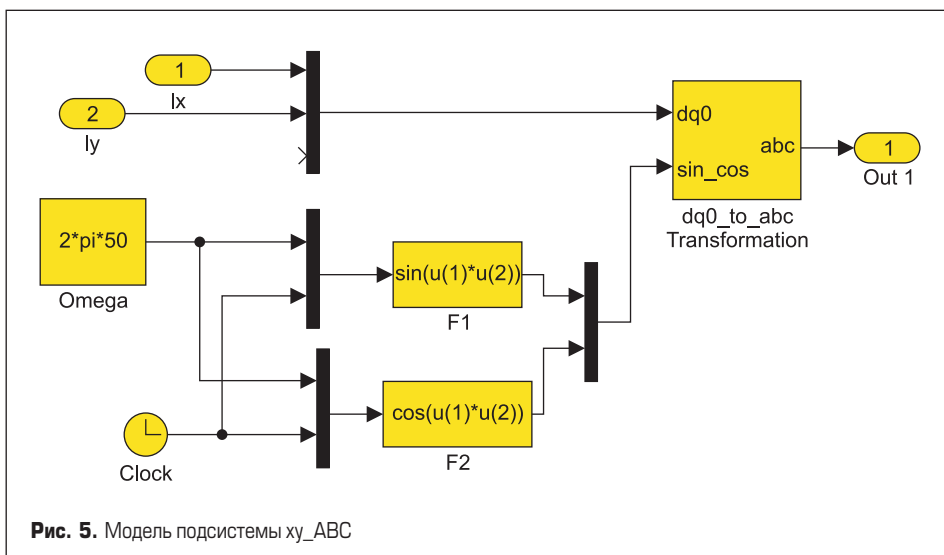


Рис. 5. Модель подсистемы xy\_ABC

Таблица 1. Библиотеки, названия, пиктограммы и параметры блоков

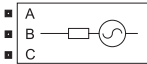
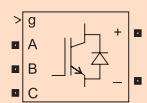

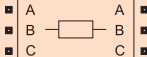












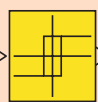
Библиотека	Блок	Параметры блока
SimPowerSystems \ Electrical Sources	 Трехфазный источник	Phase to phase rms voltage (V) — 380; Phase angle of phase A (degrees) — 90; Frequency (Hz) — 50; Internal connection — Y; Source resistance (Ohm) — 0.001; Source inductance (H) — 0
SimPowerSystems \ Power Electronics	 Универсальный мост	Number of bridge arms — 3; Snubber resistance Rs (Ohm) — 1e5; Snubber capacitance Cs-inf; Power Electronic devices — IGBT/Diodes; Ron (Ohm) — 1e-3; Forward Voltage — [0 0]; Tf(s), Tr(s) — 1e-6, 2e-6; Measurements-None
SimPowerSystems \ Electrical Sources	 Управляемый источник постоянного напряжения	Source Type — DC; Initial amplitude (V) — 0; Measurements-None
SimPowerSystems \ Elements	 Последовательная RLC-цепь	Three-Phase Series RLC Branch 1 Branch type — L; Inductance (H) — 0.005; Measurements-None Three-Phase Series RLC Branch (C) Branch type — C; Capacitance — 1e-3; Measurements-None
SimPowerSystems \ Elements	 Последовательная RLC цепь	10 Ом; 0,1 Гн
SimPowerSystems \ Measurement	 Измерители напряжения и тока	Out signal — Complex
Simulink \ Source	 Задание против-ЭДС	Time value [0 1]; Output value [-200 4000]
Simulink \ Sinks	 Блок записи процессов в рабочее пространство	Variable name — Out3; Limit data points to last — 2000; Decimation — 10; Sample time — 1e-5; Save format — Array.
Simulink \ Signal Routing	 Передача/прием сигнала	
Simulink \ Extras \ Additional Linear	 ПИД-регулятор	Proportional — 0.5; Integral — 0.5; Derivative — 0.001; Derivative divisor(N) — 100
Simulink \ Continuous	 Блок задержки	Time galy — 1e-5; Initial buffer size — 4096; Pade order — 0
Simulink \ Math Operation	 Сумматор	

Таблица 2. Параметры подсистемы Hit\_Control

SimPowerSystems \ Extras \ Measurement	 Преобразователь координат	
Simulink \ User Defined Functions	 Функция, определяемая пользователем	Fn 1 — sin(u(1)*u(2)); Fn 2 — cos(u(1)*u(2))
Simulink \ Source	 Часы	
Simulink \ Source Simulink \ Sink	 Входной и выходной порты	
Simulink \ Discontinuous	 Блок реле	Relay 1,3,5: Switch on point — 0.1; Switch off point — -0.1; Output when on — 1; Output when off — 0  Relay 2,4,6: Switch on point — 1; Switch off point — -0; Output when on — 0; Output when off — 1

Модельное исследование напряжения на конденсаторе ВИП в замкнутом электроприводе

Основной задачей управления ВИП в замкнутом электроприводе является стабилизация напряжения на конденсаторе фильтра в звене постоянного тока. В качестве дополнительной задачи обычно выдвигается требование поддержания коэффициента мощности равным единице. Модель, которая позволяет исследовать энергетические характеристики сетевого инвертора при заданном стабилизированном напряжении в звене постоянного тока и раздельном управлении по проекциям тока в сети  $I_x$  и  $I_y$ , представлена на рис. 4.

Разработка модели ВИП в замкнутом электроприводе осуществлялась при использовании структурно-функциональных (пакет Simulink) и виртуальных (пакет расширения SimPowerSystems) моделей [10, 11]. Каждый блок пакетов Simulink и SimPowerSystems имеет окно настройки основных параметров. Библиотеки, названия, пиктограммы и параметры блоков представлены в таблице 1. В блоке  $x, y$  — ABC (рис. 4) осуществляется преобразование из вращающейся системы координат  $(x, y)$  в неподвижные A, B, C в соответствии с уравнениями (7, 8). В блок Hist\_Control включены три релейных регулятора, реализующие «токовый коридор» в инверторе. Для того чтобы сетевой инвертор не потреблял реактивной мощности, ток по оси  $x$  ( $I_x$ ) задается равным нулю.

Для стабилизации напряжения в звене постоянного тока сетевого инвертора контур регулирования тока по оси  $y$  строится как подчиненный контуру стабилизации напряжения, в котором используется ПИД-регулятор. В рассматриваемом модельном эксперименте ток нагрузки в течение времени моделирования изменяется за счет изменения против-ЭДС.

Модель подсистемы, обозначенной как  $xu\_ABC$ , в которой осуществляется преобразование синхронно вращающейся системы координат  $x, y$  в неподвижную систему координат, и задающей токи в фазах A, B, C инвертора, показана на рис. 5. Она содержит библиотечные блоки, которые приведены в таблице 2. Подсистема Hit\_Control представляет собой релейные регуляторы, модель этой подсистемы показана на рис. 6, а параметры помещены в таблицу 2.

Модель измерительной подсистемы Subsystem показана на рис. 7. В модели используются рассмотренные выше входные и выходные порты и два блока гармонического анализа из библиотеки SimPowerSystems Extras Measurement.

На рис. 8 представлены квазиустановившиеся процессы в системе, когда ток на выходе ВИП изменяется по трапецидальному закону. В этом случае на временном интервале, где ток нагрузки постоянен, имеет место установившийся режим работы системы (двигательный при положительном токе, генераторный — при отрицательном). На временном интервале, где ток меняется по линейному закону, имеет

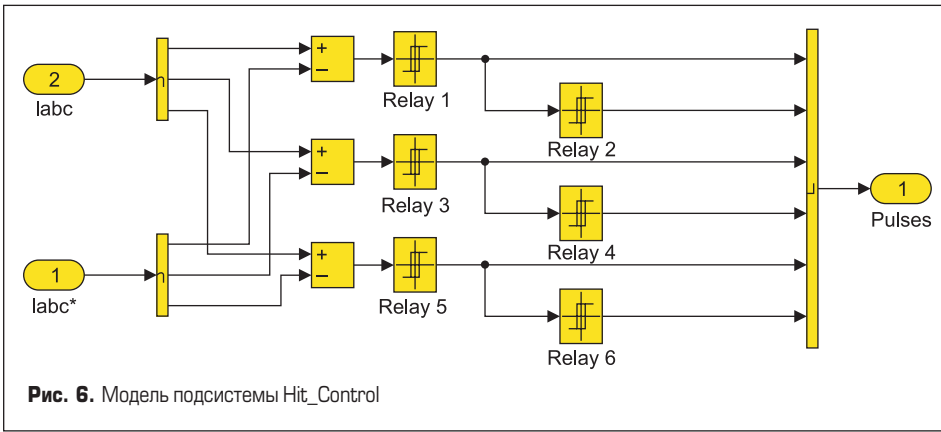


Рис. 6. Модель подсистемы Hit\_Control

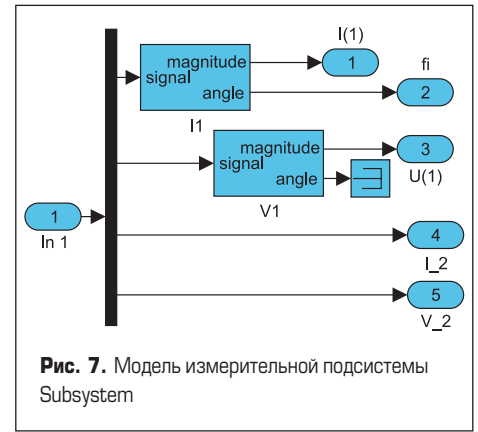


Рис. 7. Модель измерительной подсистемы Subsystem

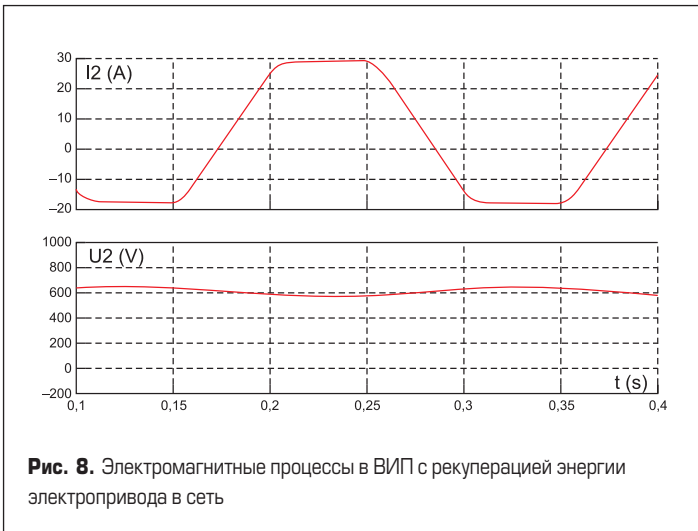


Рис. 8. Электромагнитные процессы в ВИП с рекуперацией энергии электропривода в сеть

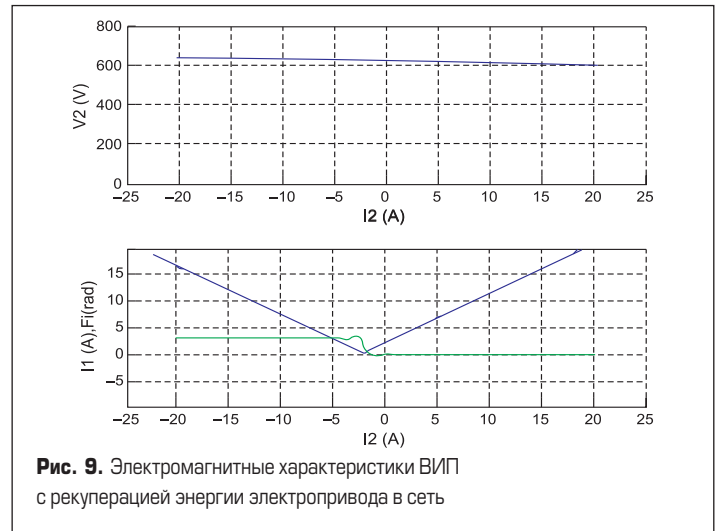


Рис. 9. Электромагнитные характеристики ВИП с рекуперацией энергии электропривода в сеть

место переходный режим работы системы. Таким образом, при трапецидальном токе в нагрузке ВИП можно исследовать как переходные, так и установившиеся режимы работы системы. Результаты моделирования показывают, что напряжение на конденсаторе при рассмотренных квазистационарных режимах работы системы изменяется незначительно.

Электромагнитные характеристики в установившемся режиме работы системы показаны на рис. 9. Для получения электромагнитных характеристик во всем диапазоне изменения тока нагрузки ВИП в модели в блоке Repeating Sequence формируется линейно изменяющийся сигнал. При этом скорость изменения этого сигнала подбирается такой, чтобы составляющей  $L(di_H/dt)$  по сравнению с  $Ri_H$  в уравнении (1) можно было пренебречь, чем и достигается установившийся режим работы ВИП при различном токе нагрузки. Для построения основных характеристик представленных на рис. 9 служит программа, помещенная в листинге 1.

```

Листинг 1
I1=Out3(:,1);%Амплитуда тока в сети.
fi=Out3(:,2);%Действующий ток в сети.
Fi=2*pi/3+pi/2-(fi*pi/180);%Сдвиг по фазе.
V1=Out3(:,3);%Амплитуда напряжения в сети.
I2=Out3(:,4);%Ток в нагрузке.
V2=Out3(:,5);%Напряжение нагрузки.
S11=(1.5*V1.*I1);%Полная мощность в сети.
Q11=S11.*sin(Fi);%Реактивная мощность в сети.
P11=S11.*cos(Fi);%Активная мощность в сети.
P2=V2.*I2;%Мощность в нагрузке.
subplot(2,1,1);
plot(I2,V2,I2,0);%Внешняя (нагрузочная) характеристика.
grid on;
xlabel('I2 (A)');
ylabel('V2 (V)');
subplot(2,1,2);
plot(I2,I1,I2,Fi);%Электромагнитные характеристики.
grid on;
xlabel('I2 (A)');
ylabel('I1 (A),Fi (rad)');
    
```

При этом отрицательный ток соответствует генераторному режиму работы системы, а положительный ток — двигательному.

Характеристики (рис. 9), полученные на модели, показывают, что ток  $I_1$  в сети увеличивается при росте тока нагрузки ВИП0 как в двигательном, так и в генераторном режиме работы системы электропривода. Потребление энергии из сети или рекуперация энергии в сеть определяется фазой тока относительно напряжения. В генераторном режиме фаза тока относительно напряжения равна  $180^\circ$ , а в двигательном —  $0^\circ$ .

Внешняя характеристика ВИП, представляющая собой зависимость напряжения на его выходе от тока на выходе, достаточно жесткая при изменении тока в нагрузке (рис. 9).

Программа для построения энергетических характеристик представлена в листинге 2.

```

Листинг 2
I1=Out3(:,1);%Амплитуда тока в сети.
fi=Out3(:,2);%Действующий ток в сети.
Fi=2*pi/3+pi/2-(fi*pi/180);%Сдвиг по фазе.
V1=Out3(:,3);%Амплитуда напряжения в сети.
I2=Out3(:,4);%Ток в нагрузке.
V2=Out3(:,5);%Напряжение нагрузки.
S11=(1.5*V1.*I1);%Полная мощность в сети.
Q11=S11.*sin(Fi);%Реактивная мощность в сети.
P11=S11.*cos(Fi);%Активная мощность в сети.
P2=V2.*I2;%Мощность в нагрузке.
plot(P2,P1,P2,Q1);%Энергетические характеристики.
grid on;
xlabel('P1(W), Q1 (Var)');
ylabel('P2 (W)');
    
```

Энергетические характеристики системы, полученные на модели, представлены на рис. 10.

Положительная активная мощность на входе и выходе ВИП соответствует режиму передачи энергии из сети в нагрузку (режим выпрямителя), отрицательная — режиму рекуперации энергии в сеть. Потери мощности в инверторе определяются значением  $P_2$  при  $P_1 = 0$ . Ток в питающей сети и его спектр в режиме активного выпрямителя показаны на рис. 11.

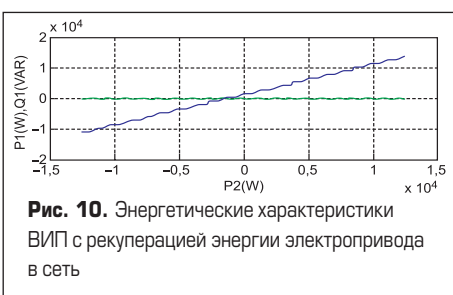


Рис. 10. Энергетические характеристики ВИП с рекуперацией энергии электропривода в сеть

Литература

1. Ануфриев И., Смирнов А., Смирнова Е. MATLAB 7. Наиболее полное руководство. СПб.: БХВ-Петербург, 2005.
2. Герман-Галкин С. Г. Школа MATLAB. Урок 6. Программные и инструментальные сред-



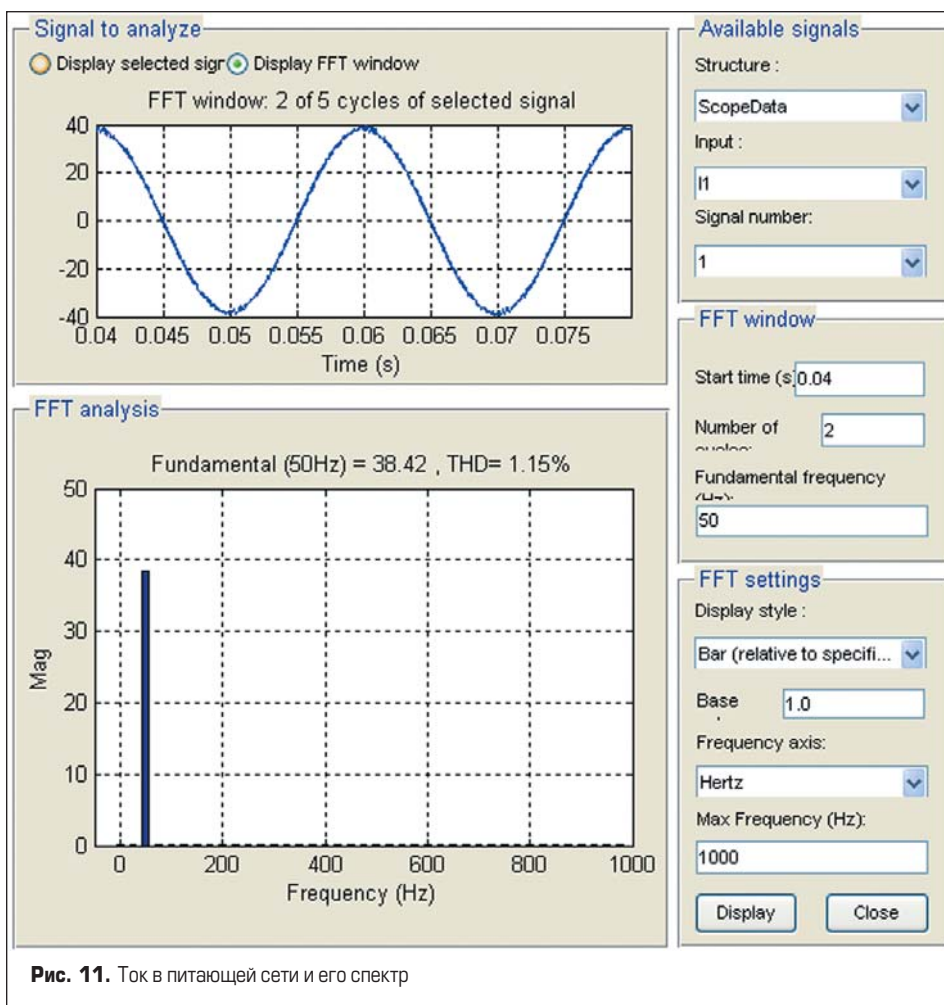


Рис. 11. Ток в питающей сети и его спектр

- ства представления результатов моделирования // Силовая электроника. 2007. № 4.
- Герман-Галкин С. Г. Школа MATLAB. Урок 7. Модельное исследование основных характеристик силовых полупроводниковых преобразователей // Силовая электроника. 2008. № 1.
  - Герман-Галкин С. Г. Школа MATLAB. Урок 9. Вторичные источники питания в полупроводниковом электроприводе // Силовая электроника. 2008. № 4.
  - Худяков В. Моделирование устройств силовой электроники. Урок 1. Основные инструменты Simulink // Силовая электроника. 2005. № 1.
  - Худяков В. Школа MATLAB. Урок 2. Библиотека SimPowerSystem // Силовая электроника. 2005. № 2.
  - Худяков В. Школа MATLAB. Урок 3. Построение SPS-моделей с полупроводниковыми элементами // Силовая электроника. 2005. № 3.
  - Худяков В. Школа MATLAB. Урок 4. Анализ динамических свойств устройств силовой электроники во временной области // Силовая электроника. 2005. № 4.
  - Худяков В. Школа MATLAB. Моделирование устройств силовой электроники. Урок 5. Анализ устройств силовой электроники в частотной области // Силовая электроника. 2006. № 1.
  - Черных И. В. Simulink: среда создания инженерных приложений. М.: Диалог-МИФИ, 2004.
  - Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. СПб.: Питер, 2008.