

Силовой канал собран на базе виртуальных блоков пакета расширения SimPowerSystem, а управляюще-информационный канал реализован с помощью блоков основного пакета Simulink по структуре двухконтурной системы подчиненного регулирования скорости и тока (момента).

Особенностью и удобством версии MATLAB 7.0.1 является наглядность в распознавании силовой части схемы (соединительные линии между блоками со входами и выходами в виде квадратов) и системы управления (привычные связи со стрелками, указывающими направление их действия). В качестве недостатка необходимо отметить невозможность стыковки элементов обоих каналов без специальных блоков, набор которых достаточно ограничен.

Принципы построения и исследования отдельных элементов виртуальных моделей изложены в работах [3, 4.], а систем управления электроприводами – в монографии [5].

Функциональное назначение блоков и подсистем модели с указанием вводимых переменных и параметров в полях настройки соответствующих элементов приведено в табл. 1.

Таблица 1

Обозначение	Наименование и назначение блоков	Вводимые параметры
1	2	3
СИЛОВОЙ КАНАЛ ЭЛЕКТРОПРИВОДА (пакет SimPowerSystem)		
AC	Источник трехфазного напряжения переменного тока с глухо заземленной нейтралью	Амплитуда фазного напряжения, начальный угол, частота сети, активное сопротивление и индуктивность источника
DC	Однофазный источник постоянного напряжения	Величина напряжения
QF1 QF2 QF3	Трехфазные автоматические выключатели	Активное сопротивление в замкнутом состоянии, сопротивление воздушного промежутка в разомкнутом состоянии
M	Асинхронный электродвигатель с фазным ротором	Тип ротора, номинальная мощность, действующее линейное напряжение, частота, ток, активные сопротивления и индуктивности статора и ротора, индуктивность контура намагничивания, момент инерции, коэффициент вязкого трения, число пар полюсов, начальные условия
TV	Согласующий трехфазный трансформатор напряжения в цепи ротора	Полная мощность, частота сети, линейные напряжения первичной и вторичной обмоток, их активные и индуктивные сопротивления, параметры ветви намагничивания
UZ	Трехфазный инвертор на тиристорах	Сопротивление тиристоров и падение напряжения на них в открытом состоянии
AUZ	Система импульсно-фазового управления инвертором	Частота сети, ширина и вид управляющих импульсов
U	Трехфазный выпрямитель на диодах	Сопротивление диодов и падение напряжения на них в открытом состоянии
L	Сглаживающий реактор в цепи постоянного тока	Активное сопротивление и индуктивность
UV1_UI1	Подсистема определения фазных токов и напряжений на входе всей системы в целом	Отсутствуют
UV2_UI2	Подсистема определения фазных токов и напряжений в роторной цепи каскада	Отсутствуют
UV	Подсистема определения линейных напряжений в роторной цепи каскада	Отсутствуют
UA	Датчик тока в цепи выпрямленного тока ротора	Отсутствуют
УПРАВЛЯЮЩЕ-ИНФОРМАЦИОННЫЙ КАНАЛ ЭЛЕКТРОПРИВОДА (пакет Simulink)		
AQF2 AQF3	Блоки выдачи сигналов на включение автоматических выключателей	Время и амплитуда подачи команды на включение (сигнал логической 1)
St	Блок снятия блокировки на запрещение работы СИФУ инвертором	Время и амплитуда (сигнал логического 0) подачи команды на снятие запрета (блокировки) работы СИФУ
ER	Блок задания требуемой скоростной диаграммы	Время и амплитуда подачи соответствующих сигналов

1	2	3
AI-1	Задатчик интенсивности первого порядка	Ограничения выходного сигнала нелинейного элемента, коэффициент передачи интегратора
F	Фильтр (апериодическое звено первого порядка)	Коэффициент передачи и постоянная времени
AR AA	ПИ-регуляторы скорости и тока	Коэффициенты передачи пропорциональной и интегральной составляющих, дискретность и ограничения интегратора и выходного сигнала
Sub	Подсистема согласования сигнала управления с углом отпирания тиристоров СИФУ инвертора	Коэффициент согласования сигнала управления с углом управления, начальное значение угла управления, при котором напряжение на выходе преобразователя и возбудителя равно нулю
DB	Подсистема перевода схемы АВК в режим динамического торможения	Логика переключения автоматических выключателей QF1, QF2
Mc	Подсистема формирования постоянного характера момента нагрузки	Время подачи и снятия нагрузки
Kw Ki	Блоки формирования сигналов обратных связей по скорости и выпрямленному току ротора	Коэффициенты передачи соответствующих обратных связей
BE1 BE2	Подсистемы определения энергетических показателей всей системы электропривода в целом и роторной цепи каскада в отдельности	С помощью соответствующих блоков реализованы требуемые математические зависимости
To Workspace 1 To Workspace 2	Блоки переноса всех вычислений в рабочее пространство системы MATLAB	Отсутствуют
Clock 1 Clock 2	Блоки задания временного интервала	Отсутствуют

Задаваемая скоростная диаграмма работы модели соответствует следующему алгоритму:

$t = 0$ – блок AQF2 через сумматор Sum подает команду на включение автомата QF2 (статорная обмотка асинхронного двигателя получает питание от сети AC); подключается роторная цепь каскада к питающей сети (блок AQF3 подает команду на включение автомата QF3, блок St разрешает работу СИФУ AUZ тиристорного инвертора UZ); начинает работу система управления (блок ER выдает сигнал, пропорциональный заданному значению максимальной скорости, а блок Mc формирует постоянную нагрузку);

$0 < t \leq 2$ с – разгон электропривода до максимальной скорости ω_{\max} ;

$2 < t \leq 4$ с – движение с установившейся максимальной скоростью ω_{\max} ;

$4 < t \leq 5$ с – замедление электропривода до половинной скорости $\omega_{\max} / 2$ (блок ER уменьшает входной сигнал задания скорости в два раза);

$5 < t \leq 6$ с – движение с установившейся скоростью $\omega_{\max} / 2$;

$6 < t \leq 6.5$ с – замедление электропривода до скорости $\omega_{\max} / 5$ (блок ER снижает входной сигнал задания скорости в пять раз);

$6.5 < t \leq 7.5$ с – движение с установившейся скоростью $\omega_{\max} / 5$;

$7.5 < t < 8$ с – торможение электропривода до полной остановки (блок ER снижает входной сигнал задания скорости до нуля);

$t = 8$ – окончание моделирования.

Расчетные формулы для коэффициентов передачи пропорциональной K_p и интегральной K_i частей регуляторов имеют вид:

- регулятор тока

$$K_p = T_e R_e / (a_i T_\mu K_{cp} K_i),$$

$$K_i = R_e / (a_i T_\mu K_{cp} K_i);$$

- регулятор скорости

$$K_p = K_i J / (a_\omega a_i T_\mu K_m K_\omega),$$

$$K_i = K_i J / (a_\omega^2 a_i^2 b_\omega T_\mu^2 K_m K_\omega),$$

где J – полный момент инерции системы, R_e – эквивалентное активное сопротивление роторной цепи, T_e – эквивалентная постоянная времени, K_m – коэффициент передачи по моменту, T_μ – некомпенсируемая малая постоянная времени инвертора, K_{cp} – коэффициент передачи инвертора, K_ω – общий коэффициент передачи обратной связи по скорости, K_i – общий коэффициент передачи обратной связи по току, a_ω – настроечный параметр

контура скорости, a_1 - настроечный параметр контура тока, b_0 - дополнительный настроечный параметр контура скорости.

Динамические процессы, протекающие в системе электропривода, и энергетические показатели за рассматриваемый период моделирования фиксируются в рабочем пространстве системы MATLAB с помощью блоков To Workspace 1 (для всей системы в целом) и To Workspace 2 (для роторной цепи каскада).

На рис. 2 изображены диаграммы изменения основных контролируемых переменных: заданной $\omega_0(t)$ и действительной $\omega(t)$ угловых скоростей (рис. 2, а), момента нагрузки $M_c(t)$ и момента на валу двигателя $M(t)$ (рис. 2, б), а также угла управления инвертором $\alpha(t)$ (рис. 2, в).

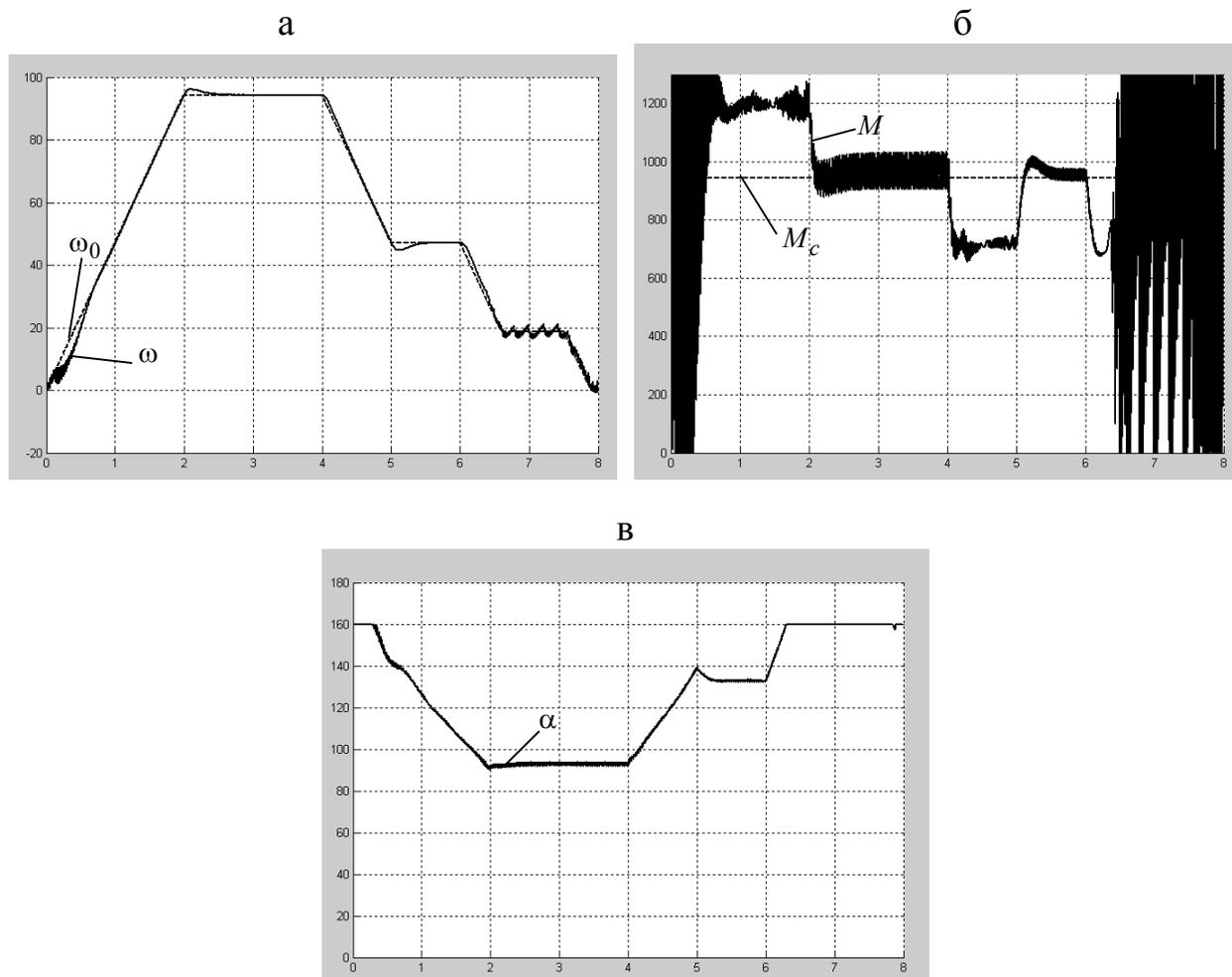


Рис. 2. Диаграммы изменения контролируемых переменных: а – заданной ω_0 и фактической ω скоростей; б – моментов сопротивления M_c и двигателя M ; в – угла управления инвертором α

Полученная скоростная диаграмма показывает достаточно точную обработку заданной скорости в диапазоне 2:1 (кроме начального участка разгона), однако при увеличении диапазона регулирования (в рассматриваемом случае до 5:1) в кривой фактической скорости появляются колебания.

Диаграмма моментов иллюстрирует постоянный характер нагрузки, а также соответствие основному уравнению движения электропривода при затухающих колебаниях на участках запуска и торможения.

Совместное рассмотрение скоростной диаграммы и диаграммы моментов позволяет определить двигательный режим работы системы электропривода (знаки угловой скорости и момента совпадают).

В этом случае режим динамического торможения не включается, а регулирование (увеличение или снижение) скорости осуществляется соответствующим изменением угла управления инвертором, что наглядно показывает диаграмма $\alpha(t)$. Вначале угол плавно уменьшается от 160 до 90 электрических градусов на участке запуска, при этом ЭДС инвертора становится равной нулю, и скорость двигателя в системе АВК становится максимальной. В дальнейшем по мере снижения скорости угол управления возрастает. При половинной скорости угол составляет порядка 130 градусов, а для нижней границы принятого диапазона регулирования скорости он приближается к 160 градусам, что и приводит к колебаниям скорости на этом участке.

При другом варианте нагрузки (например, вентиляторной [2]) подсистема DB подала бы команду на отключение автоматического выключателя QF2 и включение QF1, тем самым обеспечивая режим динамического торможения за счет подачи в две фазы статора напряжения постоянного тока от источника DC.

К основным энергетическим характеристикам электропривода обычно относят рабочие характеристики [6]: зависимости активной $P1$, реактивной $Q1$ и полной потребляемой мощности $S1$ от мощности нагрузки на валу двигателя $P2$.

Эти характеристики позволяют определить коэффициент полезного действия $\eta = P2 / P1$ и коэффициент мощности $\cos\varphi = P1 / S1$.

Основные энергетические показатели для системы АВК в целом определяются подсистемой BE1. Входными сигналами являются мгновенные значения фазных напряжений и токов, потребляемых из сети всей системой электропривода, которые определяются в UV1_UI1. Также на вход BE1 подаются сигналы фактической угловой скорости ω и момента двигателя M для вычисления полезной мощности на валу двигателя $P2 = M\omega$.

Выходными сигналами подсистемы BE1 являются:

$$S1 \text{ (кВА)}, P1 \text{ (кВт)}, Q1 \text{ (кВАр)}, P2 \text{ (кВт)}, \cos\varphi \text{ (о.е.)}, \eta \text{ (\%)}$$

Основным элементом подсистемы BE1 является блок Active & Reactive Power, который из трехфазной системы фазных напряжений и токов выделяет активную $P1$ и реактивную $Q1$ составляющие мощности. Затем реализуется зависимость

$$S1 = (P1^2 + Q1^2)^{0,5}$$

Исследование энергетических процессов, протекающих в роторной цепи АВК, обеспечивается подсистемой BE2 (аналогичной BE1), которая по входным фазным напряжениям и токам (определяются в UV2_UI2) вычисляет полную мощность роторной цепи Sr (кВА), а также ее составляющие: активную Pr (кВт) и реактивную Qr (кВАр).

На рис. 3 показаны временные диаграммы изменения мощностей за моделируемый период для системы АВК в целом (рис. 3, а) и для роторной цепи каскада в отдельности (рис. 3, б).

Диаграмма мощностей всей системы наглядно отображает динамику изменения полной мощности и ее составляющих на всех характерных участках скоростной диаграммы. При этом потребление реактивной мощности превышает активную составляющую, что является недостатком системы АВК.

Из диаграммы мощностей роторной цепи виден процесс генерации активной мощности в сеть с увеличением этой составляющей при снижении скорости, что является достоинством АВК. Однако потребление реактивной мощности в роторной цепи при этом весьма значительно.

На рис.4 представлена динамика изменения таких важных энергетических показателей электропривода, как коэффициент мощности $\cos\varphi$ (рис. 4, а) и коэффициент полезного действия η (рис. 4, б).

Диаграмма $\cos\varphi = f(t)$ подтверждает тот факт, что для системы АВК характерно невысокое значение коэффициента мощности, особенно на малых скоростях. Так, в нашем случае, при работе с максимальной скоростью он составляет около 0,6, а при половинной скорости около 0,4.

Коэффициент полезного действия относительно невысок и составляет около 90 % для верхней границы диапазона регулирования и порядка 70 % при снижении скорости в два раза с дальнейшей тенденцией к уменьшению при расширении диапазона регулирования скорости.

Размещение всех результатов вычислений в рабочем пространстве системы MATLAB с помощью блоков To Workspace 1 (для всей системы в целом) и To Workspace 2 (для роторной цепи каскада) позволяет достаточно удобно и быстро получить графические зависимости между необходимыми контролируемыми переменными в любом их сочетании. Например, получить фазовые траектории энергетических характеристик системы АВК, таких как: $S1 = f(P2)$, $P1 = f(P2)$, $Q1 = f(P2)$, $\cos\varphi = f(P2)$ и $\eta = f(P2)$.

Некоторая размытость траекторий при малых значениях полезной мощности обусловлена колебательным характером момента на начальном участке запуска и при работе на малых скоростях.

Типичным для всех характеристик является наличие петли, что соответствует двум разным режимам работы электропривода: запуску и торможению.

Для количественного определения значений контролируемых переменных и энергетических показателей наиболее просто и удобно использовать блоки цифровой индикации Display пакета Simulink, входы которых подключаются к соответствующим линиям связи (находятся внутри подсистем BE1 и BE2). При этом необходимо останавливать процесс моделирования в требуемый момент времени (использовать кнопку “пауза” на панели инструментов) и записывать показания.

В табл. 2 сведены результаты измерений для моментов времени, соответствующих серединам участков движения с установившейся скоростью в соответствии с рассматриваемой скоростной диаграммой.

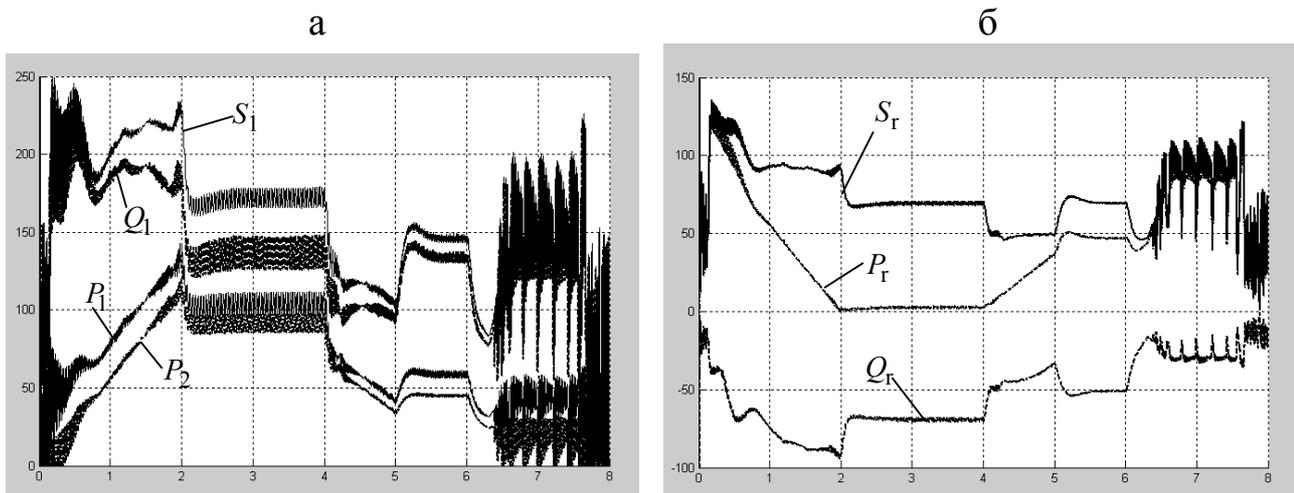


Рис. 3. Диаграммы полной мощности и ее составляющих: а – системы АВК в целом; б – роторной цепи каскада

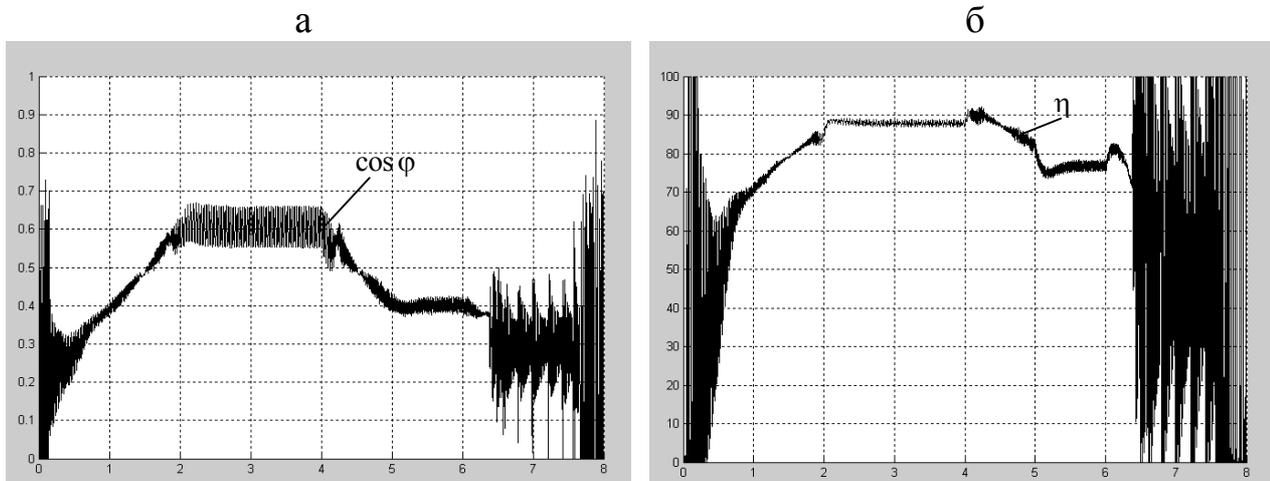


Рис. 4. Диаграммы изменения энергетических показателей: а – коэффициента мощности $\cos\varphi$; б – коэффициента полезного действия η

Таблица 2.

Угловая скорость	Система АВК в целом						Роторная цепь каскада		
	P2 (кВт)	P1 (кВт)	Q1 (кВАр)	S1 (кВА)	$\cos\varphi$ (о.е.)	η (%)	Pr (кВт)	Qr (кВАр)	Sr (кВА)
ω_{\max}	88,5	100,8	146,7	178,0	0,57	88,0	3,4	- 70,6	70,7
$\omega_{\max} / 2$	45,8	60,5	133,2	146,3	0,41	76,0	46,9	- 50,7	69,0
$\omega_{\max} / 5$	23,1	44,5	123,8	131,6	0,34	52,0	86,3	- 30,4	91,5

Выводы. Полученные результаты подтверждают возможность и целесообразность исследования сложных электромеханических систем с помощью виртуальных моделей, так как они соответствуют в целом основным положениям теории автоматизированного электропривода.

Литература

1. Онищенко Г.Б., Локтева И.Л. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания. – М.: Энергия, 1979.
2. Чермалых В.М., Чермалых А.В., Майданский И.Я. Виртуальное моделирование режимов работы электропривода по схеме асинхронно-вентильного каскада // Промислова електроенергетика та електротехніка. “Промелектро”. – 2007. – № 1. – С. 61 – 66.
4. Герман-Галкин С.Г. Силовая электроника: Лабораторные работы на ПК. – СПб.: КОРОНА принт, 2002. – 304 с., ил.
5. Герман-Галкин С.Г., Кардонов Г.А. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК. – СПб.: КОРОНА принт, 2003. – 256 с., ил.
6. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с., ил.