

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТЯГОВОГО БЕЗРЕДУКТОРНОГО ПРИВОДА НА ОСНОВЕ ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ С АКСИАЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ

В роботі розглядається імітаційна модель тягового безредукторного привода на основі індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком, реалізована в середовищі візуального програмування Simulink. При створенні моделі АІД використано метод структурних схем.

Ключові слова: тяговий безредукторний привод, індукторний двигун, аксіальний магнітний потік

В работе рассматривается имитационная модель тягового безредукторного привода на основе индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком, реализованная в среде визуального программирования Simulink. При создании модели АИД использован метод структурных схем.

Ключевые слова: тяговый безредукторный привод, индукторный двигатель, аксиальный магнитный поток

In the article a simulation model of traction direct drive on the basis of inductor motor with the axial magnetic flux realized in the visual programming environment Simulink is considered. At creation of the AIM model a method block diagrams is used.

Keywords: traction direct drive, inductor motor, axial magnetic flux

Разработка нового подвижного состава требует углубленного изучения динамических процессов в электрической системе и механической части, выявления их взаимного влияния, изучения влияния внешних воздействий на характер протекания и качественные показатели процессов, происходящих в них. Поскольку экспериментальные исследования, во-первых, увеличивают финансовые затраты и сроки разработки, и, во-вторых, не позволяют провести всеобъемлющие исследования, а традиционные методы проектирования и исследования в ряде случаев не эффективны, наиболее целесообразным представляется использование математического моделирования [1]. В частности, такой подход необходим при использовании для подвижного состава тяговых приводов нового типа, содержащих нетрадиционные для тяги электрические машины и соответствующие им полупроводниковые преобразователи. Подходящим инструментарием для изучения динамики тяговых приводов, на наш взгляд, является имитационное моделирование [2].

Цель статьи: разработать имитационную модель тягового безредукторного привода на основе индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком.

Принципиальная схема силовых цепей рассматриваемого привода показана на рис. 1.

Для создания имитационной модели нами принята среда визуального программирования Simulink, предоставляющая широчайшие возмож-

ности для моделирования электроприводов [3, 4].

Как известно, в электроприводе выделяют четыре звена: двигатель, преобразователь, механическую часть и систему управления. Рассмотрим имитационные модели каждой из них, т.к. ввиду сложности имитационная модель всего привода создана с использованием подсистем.

Simulink-модель привода на основе АИД показана на рис. 2. Она состоит из подсистемы инвертора напряжения, подсистемы АИД, подсистемы системы управления и подсистемы механической части, представленной в виде одномассовой системы и введенной в подсистему АИД. Также в моделях присутствуют регистраторы сигналов и задающие устройства.

Simulink-модель инвертора напряжения показана на рис. 3. При её создании использовались элементы пакета SimPowerSystem. Здесь «собрана» электрическая схема инвертора напряжения. Параметры полупроводниковых приборов берутся из данных каталогов производителей.

На рис. 4 приведена модель системы управления. Эта модель «собрана» из элементов пакета Simulink и отображает логику функционирования без привязки к электрической схеме системы управления.

При создании модели АИД предлагается использовать структурное моделирование. Для этого сначала разработаем математическую модель АИД.

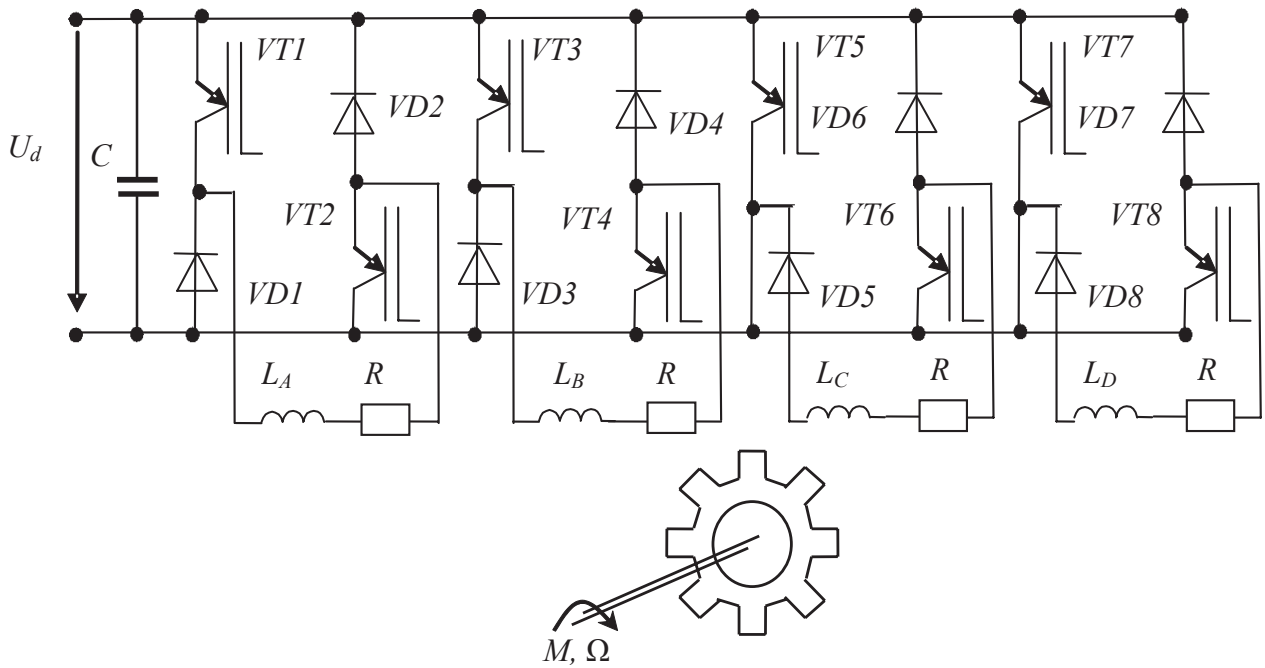


Рис. 1. Принципиальная схема силовых цепей:

U_d – напряжение звена постоянного тока, C – ёмкость фильтра, $VT1$ – $VT8$ – IGBT-транзисторы, $VD1$ - $VD8$ – диоды, L_A, L_B, L_C, L_D – индуктивности фаз, R – омическое сопротивление фаз, M – электромагнитный момент, Ω – угловая частота вращения ротора

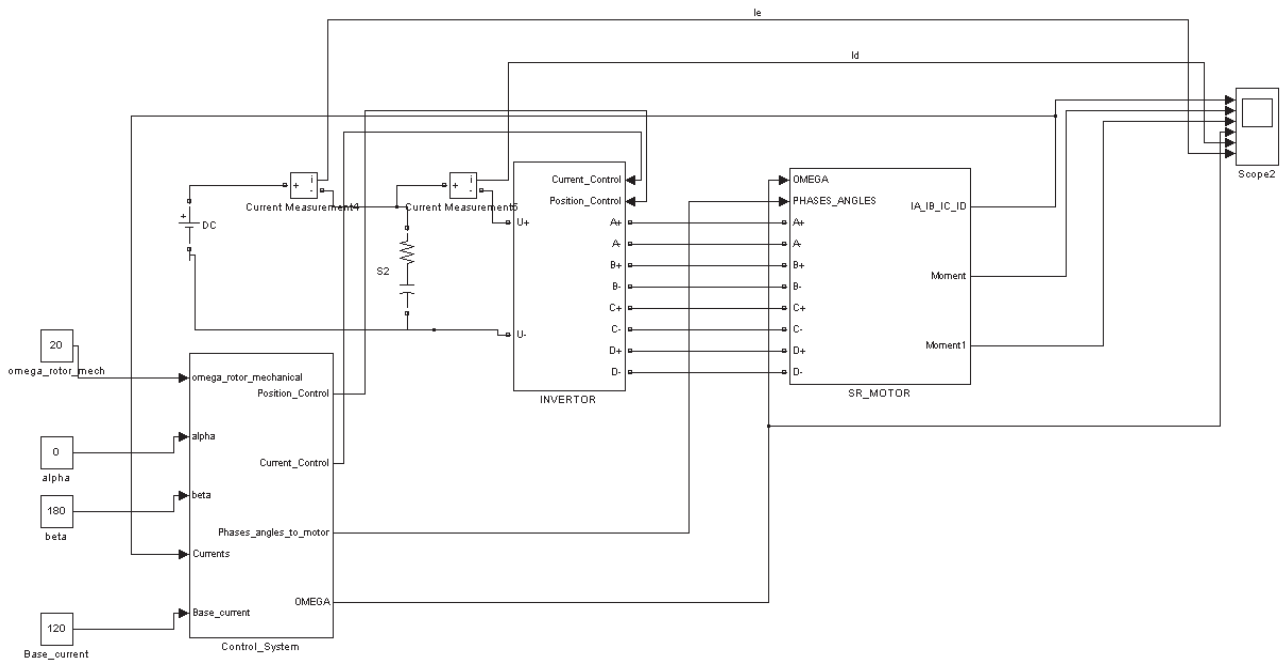


Рис. 2. Simulink-модель привода на основе АИД

Математическая модель АИД состоит из уравнений, составленных для электрических контуров, уравнений, определяющих электромагнитные связи в двигателе и уравнений движения ротора:

$$\begin{cases} u_x = i_x R + \frac{d\Psi_x}{dt}; \\ \Psi_x = \Psi(i_x, \gamma_x); \\ J \frac{d\Omega}{dt} = M_{дв} - M_c; \\ \Omega = \frac{d\gamma}{dt}, \end{cases} \quad (1)$$

где u_x – напряжение, приложенного к обмотке фазы с индексом x ; i_x – фазный ток; R – эле-

ктрическое сопротивление фазы (принимается равным для всех фаз); $\Psi_x = \Psi(i_x, \gamma_x)$ – потокосцепление фазы, J – приведенный момент инерции ротора; Ω – угловая частота вращения ротора; $M_{дв} = \sum_{x=1}^m M_x(i_x, \gamma_x)$ – момент на валу (принимается равным электромагнитному моменту); $M_x(i_x, \gamma_x)$ – момент, развиваемый фазой с индексом x ; M_c – момент сопротивления; γ – геометрический угол поворота ротора. Здесь x принимает значения A, B, C, D .

При составлении модели приняты такие допущения: гистерезис и вихревые токи не учитываются, магнитные системы фаз идентичны.

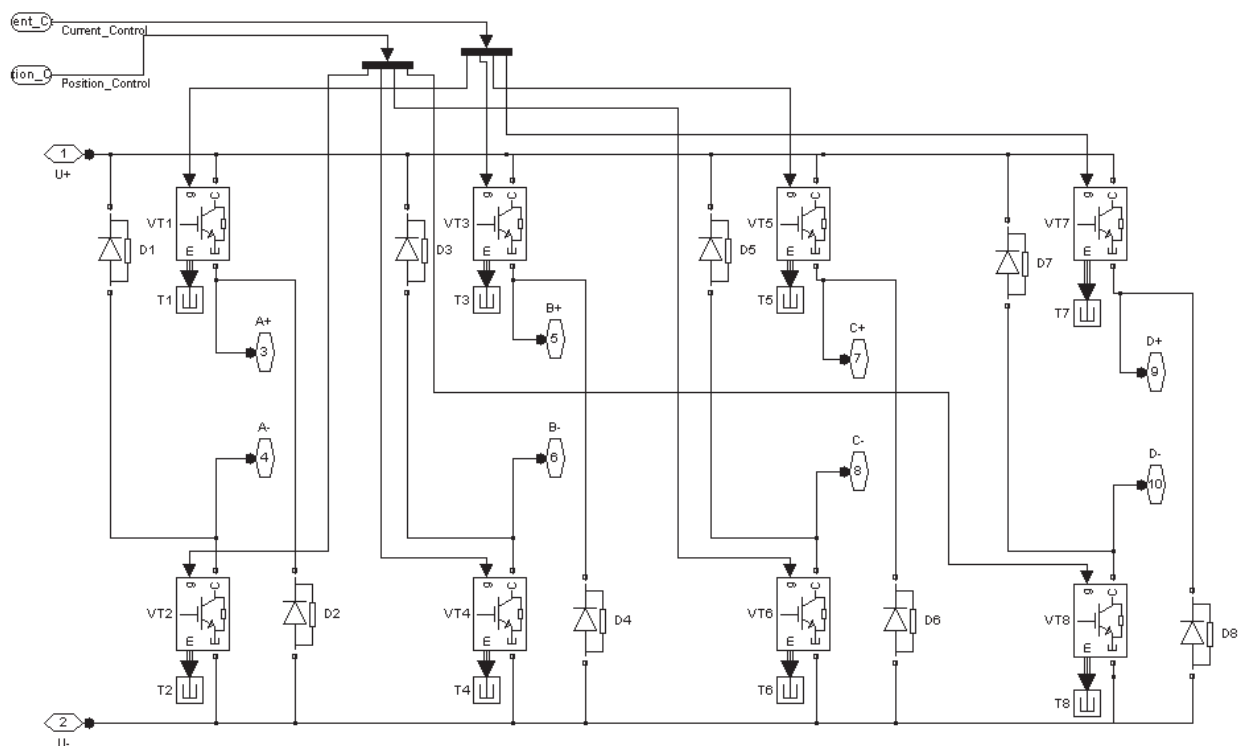


Рис. 3. Simulink-модель инвертора напряжения

На рис. 5 приведена схема замещения фазы. Преобразуем уравнения электрического равновесия. Для этого перепишем слагаемое $\frac{d\Psi_x}{dt}$ в таком виде:

$$\frac{d\Psi_x}{dt} = \frac{\partial\Psi_x}{\partial i_x} \frac{di_x}{dt} + \frac{\partial\Psi_x}{\partial \gamma} \frac{d\gamma}{dt} = L_{дх} \frac{di_x}{dt} + K_{ex} \Omega,$$

где $L_{дх} = \frac{\partial\Psi_x}{\partial i_x}$ – дифференциальная индуктивность;

$$K_{ex} = \frac{\partial\Psi_x}{\partial \gamma} \text{ – коэффициент противоЭДС.}$$

Тогда уравнение примет вид:

$$u_x = i_x R + \frac{d\Psi_x}{dt} = i_x R + L_{дх} \frac{di_x}{dt} + e_x, \quad (2)$$

где $e_x = K_{ex} \Omega$ – противоЭДС фазы.

Разрешив уравнение (1) относительно производной тока, получим:

$$\frac{di_x}{dt} = (L_{дх}^{-1}) \cdot (u_x - i_x R - e_x) \quad (3)$$

На основании уравнения (2) составим структурную схему (рис. 6).

Для механической части структурная схема имеет вид, показанный на рис. 7.

Simulink-модели фазы АИД и механической части привода приведены на рис. 8 и 9 соответственно.

Рассмотрим методику определения электромагнитных связей двигателя. Предположим, что зависимость $\Psi = \Psi(i, \gamma)$ известна (определена расчётным путём или экспериментально). Типичный вид зависимости $\Psi = \Psi(i, \gamma)$ для реактивных индукторных машин показан на рис. 10.

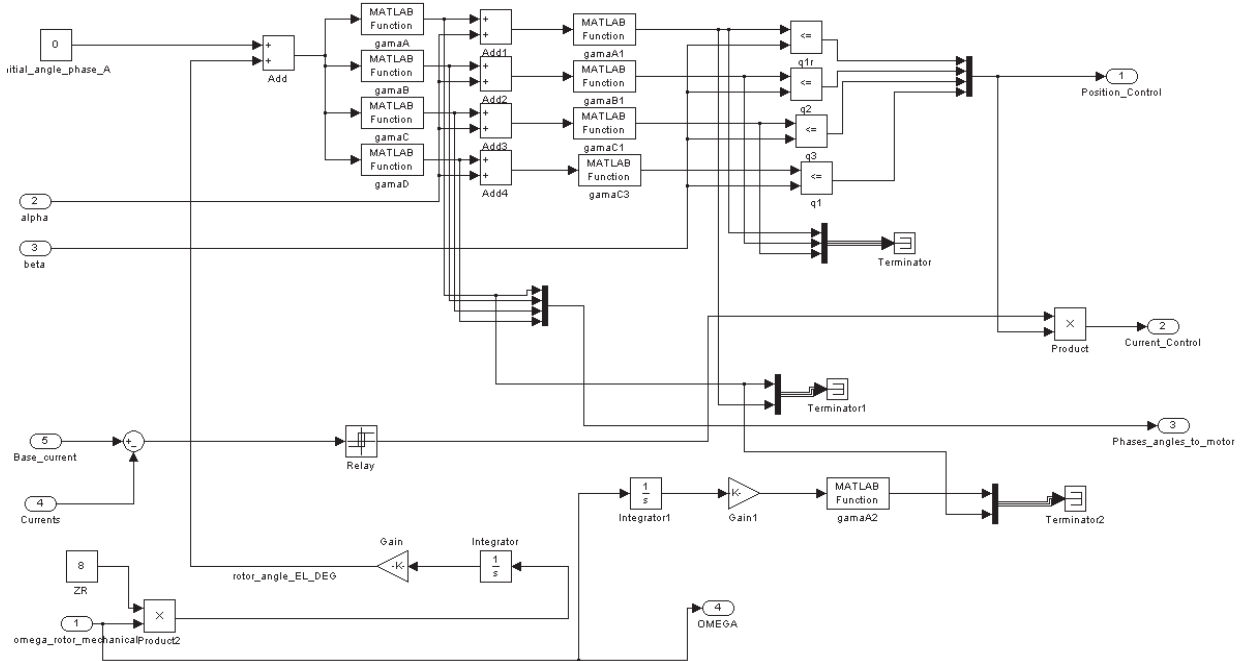


Рис. 4. Simulink-модель системы управления

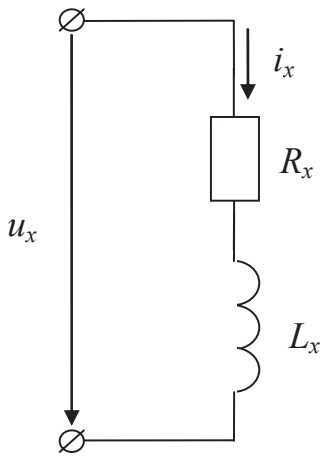


Рис. 5. Схема замещения фазы

Семейство кривых на рис. 10 может быть представлено в общем виде аналитической зависимостью следующего вида:

$$\Psi(i, \gamma) = \sum_{k=0}^N \left[\sum_{r=0}^q (A_r(i) \cdot \cos(k\gamma) + B_r(i) \cdot \sin(k\gamma)) \right], \quad (4)$$

т.е. является усечённым рядом Фурье (число удерживаемых гармоник равно N), коэффициенты которого являются функциями тока.

Вследствие симметрии зубцов, кривые на рис. 10б симметричны относительно оси ординат. Поэтому ряд Фурье (4) не содержит синусных составляющих, и формулу (4) можно переписать в виде

$$\Psi(i, \gamma) = \sum_{k=0}^N (A_k(i) \cdot \cos(k\gamma)), \quad (5)$$

где $A_k(i) = \sum_{s=0}^3 a_{s,j-1}^{(k)} (i - i_{j-1})^s$ – кубический ин-

терполяционный сплайн, аппроксимирующий зависимость коэффициентов Фурье-разложения от тока фазы [5, 6]. В этом выражении $a_{s,j-1}^{(k)}$ – коэффициент сплайна при степени s на отрезке $[i_{j-1}, i_j]$ для гармоники с номером k , (i_{j-1}, i_j) – узлы интерполяции, ограничивающие отрезок, содержащий текущее значение тока i . Под γ здесь и в дальнейшем будем подразумевать угол поворота ротора, выраженный в электрических радианах.

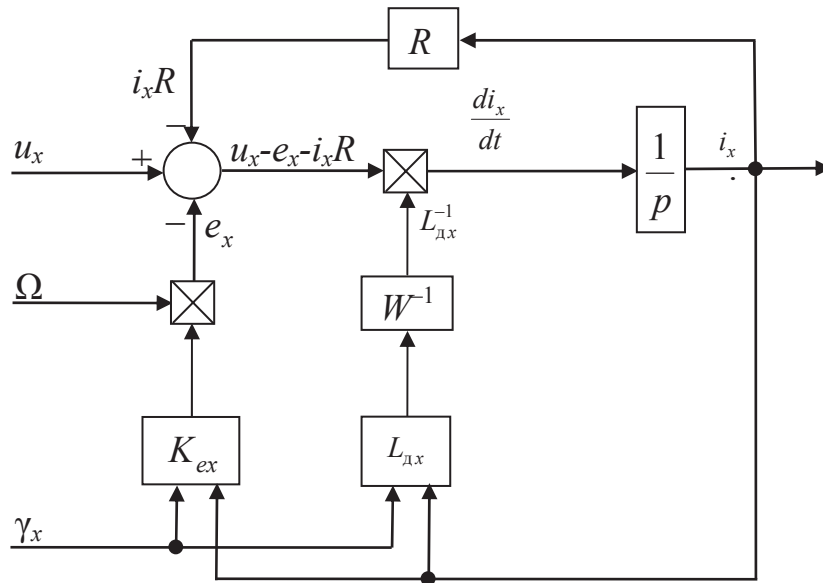


Рис. 6. Структурная схема фазы двигателя

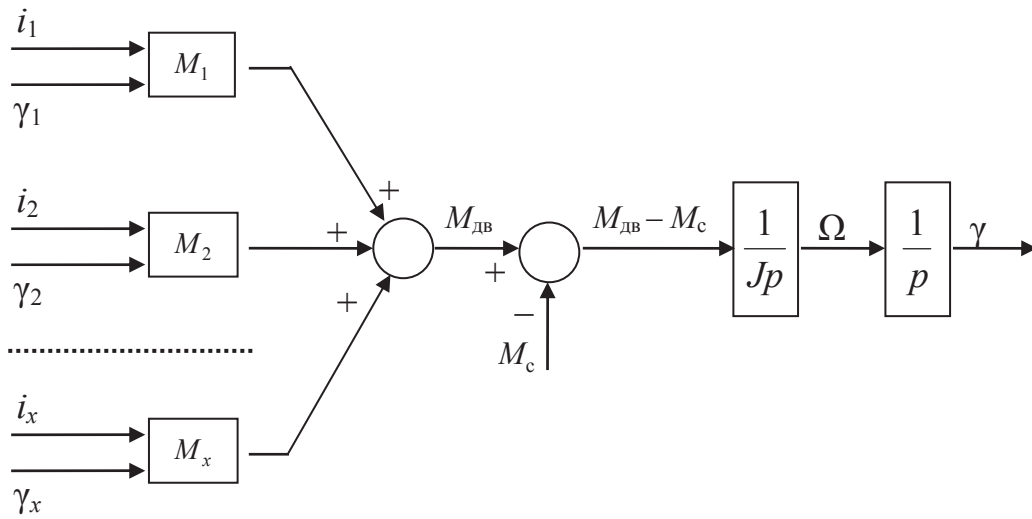


Рис. 7. Структурная схема механической части

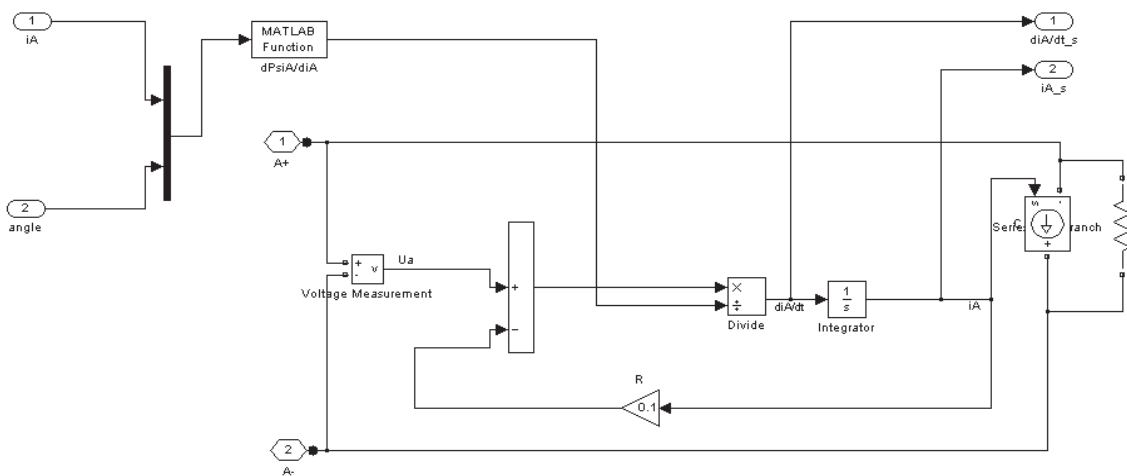


Рис. 8. Simulink-модель фазы АИД

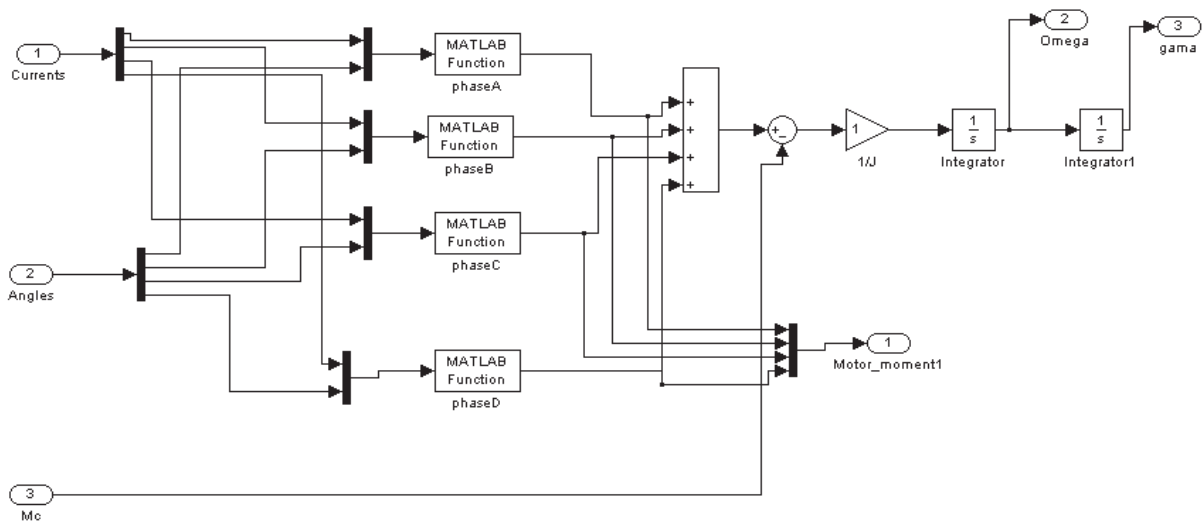


Рис. 9. Simulink-модель механической части

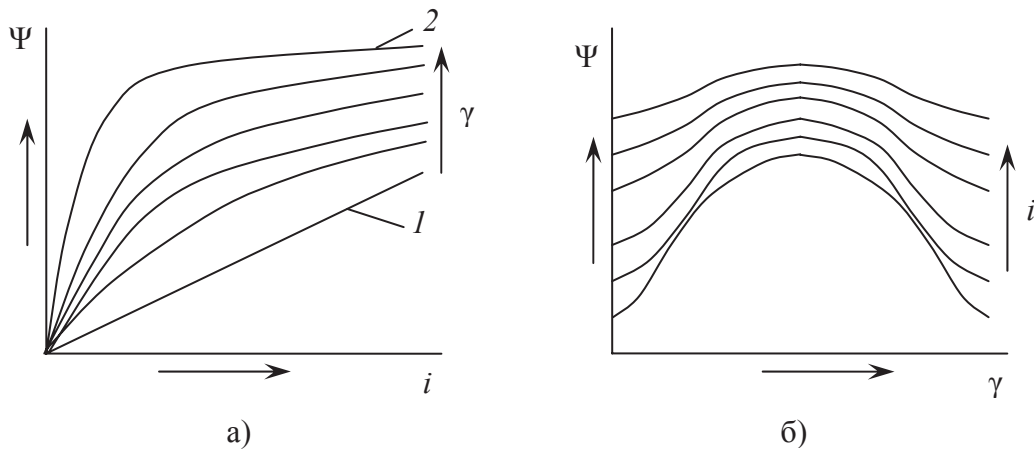


Рис. 10. Зависимости $\Psi = \Psi(i, \gamma)$:

1 – рассогласованное положение; 2 – согласованное положение

Таким образом,

$$\Psi(i, \gamma) = \sum_{k=0}^N \left(\left(\sum_{s=0}^3 a_{s,j-1}^{(k)} (i - i_{j-1})^s \right) \cos(k\gamma) \right). \quad (6)$$

Запись зависимости $\Psi = \Psi(i, \gamma)$ в виде (5) позволяет аналитически выразить индуктивность, коэффициент противоЭДС и момент.

Дифференциальная индуктивность определяется по формуле $L_d = \frac{\partial \Psi(i, \gamma)}{\partial i}$. Тогда, с учётом формулы (5) получим выражение:

$$L_d = \sum_{k=0}^N \left(\left(\sum_{s=1}^3 a_{s,j-1}^{(k)} \cdot s \cdot (i - i_{j-1})^{s-1} \right) \cos(k\gamma) \right). \quad (7)$$

Дифференцирование по току здесь допустимо, поскольку сплайн является дважды непрерывно дифференцируемой функцией на всём отрезке интерполяции.

Коэффициент противоЭДС равен $K_e = \frac{\partial \Psi(i, \gamma)}{\partial \gamma}$, или

$$K_e = -Z \sum_{k=0}^N \left(k \left(\sum_{s=0}^3 a_{s,j-1}^{(k)} (i - i_{j-1})^s \sin(k\gamma) \right) \right), \quad (8)$$

где Z – число зубцов. Множитель Z в формуле (8) учитывает то, что дифференцирование происходит по геометрическому углу, а γ есть электрический угол.

Электромагнитный момент определяется по выражению:

$$M = \left. \frac{\partial W'}{\partial \gamma} \right|_{i=const}, \quad (9)$$

где $W' = \int_0^i \Psi(i, \gamma) di$ – мгновенное значение ко-
энергии фазы. Поскольку подынтегральное вы-
ражение $\Psi(i, \gamma)$ задано в виде сплайнов, интег-
рирование проводим по методу интерполи-
рующих сплайнов.

Общее выражение имеет вид:

$$W'(i, \gamma) = \int_0^i \sum_{k=0}^N \left(\left(\sum_{s=0}^3 a_{s,j-1}^{(k)} (i - i_{j-1})^s \right) \cos(k\gamma) \right) di.$$

Поскольку нас интересуют численные зна-
чения, поступим следующим образом.

Пусть p – номер интервала, в котором нахо-
дится верхний предел интегрирования i_p . Тогда
расчётная формула для вычисления коэнергии
примет вид:

$$W'(i_p, \gamma) = \sum_{q=1}^p \left(\sum_{k=0}^N \left(\left(\sum_{s=0}^3 a_{s,q-1}^{(k)} \frac{(i_q - i_{q-1})^{s+1}}{s+1} \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \cos(k\gamma) \right) \right). \quad (10)$$

Выполнив вычисления по формуле (10), по-
лучим данные, для которых выполним проце-
дуру аппроксимации. Полученную зависимость
представим в виде:

$$W'(i, \gamma) = \sum_{k=0}^N (B_k(i) \cdot \cos(k\gamma)),$$

где $B_k(i) = \sum_{s=0}^3 b_{s,j-1}^{(k)} (i - i_{j-1})^s$ – кубический ин-
терполяционный сплайн, аппроксимирующий
зависимость коэффициентов Фурье-разложения
от тока фазы. В этом выражении $b_{s,j-1}^{(k)}$ – коэф-
фициент сплайна при степени s на отрезке
 $[i_{j-1}, i_j]$ для гармоники с номером k , (i_{j-1}, i_j) – узлы
интерполяции, ограничивающие отрезок, со-
держащий текущее значение тока i .

Таким образом,

$$W'(i, \gamma) = \sum_{k=0}^N \left(\left(\sum_{s=0}^3 b_{s,j-1}^{(k)} (i - i_{j-1})^s \right) \cos(k\gamma) \right). \quad (11)$$

Выполнив дифференцирование выражения
(11) по углу поворота, имеем:

$$M = -Z \sum_{k=0}^N \left(k \left(\sum_{s=0}^3 b_{s,j-1}^{(k)} (i - i_{j-1})^s \sin(k\gamma) \right) \right). \quad (12)$$

Зависимости (7) и (8) непосредственно ис-
пользуются в структурной схеме для вычисле-
ния тока, зависимость (12) нужна для вычисле-
ния момента.

Отдельно следует отметить, что при по-
строении сплайнов используются краевое усло-
вие «отсутствие узла», т.к. неизвестна инфор-
мация о поведении сплайнов вблизи границ от-
резка интерполяции.

Численные процедуры построения сплайнов
выполнены в Matlab [7]. Для использования в
Simulink-моделях написаны m -файлы.

Выводы

Таким образом, разработана имитационная
модель тягового привода на основе АИД, ре-
ализованная с Simulink. Имитационная модель
состоит их модели полупроводникового преоб-
разователя, модели тягового индукторного дви-
гателя с аксиальным магнитным потоком, мо-
дели механической части и модели системы
управления. Модель преобразователя собрана
на его основании электрической схемы.

При создании модели АИД использован ме-
тод структурных схем. Предложено аппрокси-
мировать усечённым рядом Фурье, коэффици-
енты гармоник которого интерполированы
кубическими сплайнами. На основании этого
разложения аналитически выражены индуктив-
ность фазы, коэффициент противоЭДС и элек-
тромагнитный момент, для которого также
проведена аппроксимация по упомянутому
выше способу.

Имитационная модель механической части
представлена одномассовой системой.

Модель системы управления «собрана» из
блоков библиотеки Simulink и отражает алго-
ритмы управления.

Разработанная имитационная модель позво-
ляет моделировать динамические процессы,
происходящие как в приводе в целом, так и в
отдельных его звеньях, обрабатывать законы
регулирования и исследовать влияние парамет-
ров отдельных элементов на процессы элек-
тромеханического преобразования энергии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Моделирование электромеханической системы электровоза с асинхронным тяговым приводом [Текст] / Ю. А. Бахвалов [и др.]. – М.: Транспорт, 2001. – 288 с.
2. Любарский, Б. Г. Имитационная модель тягового вентильно-индукторного электропривода [Текст] / Б. Г. Любарский, Е. С. Рябов, Л. В. Оверьянова // Электротехніка і електромеханіка. – 2009. – № 5. – С. 67-72.
3. Дьяконов, В. П. Simulink 4. Специальный справочник [Текст] / В. П. Дьяконов. – СПб.: Питер, 2001. – 553 с.
4. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink.[Текст] / И. В. Черных. – СПб.: Питер, 2007. – 288 с.
5. Де Бор, К. Практическое руководство по сплайнам [Текст] / К. Де Бор; [пер. с англ.]. – М.: Радио и связь, 1985. – 304 с.
6. Носач, В. В. Решение задач аппроксимации с помощью персональных компьютеров.[Текст] / В. В. Носач. – М.: МИКАП, 1994. – 382 с.
7. Кетков, Ю. Л. Matlab: Численные методы [Текст] / Ю. Л. Кетков, А. Ю. Кетков, М. М. Шульц. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 752 с.

Поступила в редколлегию 17.12.2010.

Принята к печати 21.12.2010.