

УДК 621.313.33:62-83-52

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ В MATLAB SIMULINK

И. В. ДОРОШЕНКО, М. Н. ПОГУЛЯЕВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Представлена математическая модель асинхронной машины на основе дифференциальных уравнений, в которой уравнения разрешены относительно производных потокоцеплений. Изложено описание программы в среде Matlab Simulink, реализующей описанную модель и позволяющей выполнять моделирование переходных режимов асинхронного двигателя. Приведены результаты экспериментальных исследований пуска асинхронного двигателя при синусоидальном напряжении с помощью компьютерного стенда и сравнение полученных осциллограмм с результатами моделирования по предложенной модели. Сопоставление экспериментальных и расчетных осциллограмм тока исследуемого асинхронного двигателя позволяет сделать вывод об удовлетворительной точности предложенной модели и возможности ее применения для моделирования и исследования асинхронных электроприводов.

Ключевые слова: асинхронный двигатель с фазным ротором, имитационная модель, компьютерное моделирование, модель асинхронной машины с фазным ротором, моделирование электропривода.

ASYNCHRONOUS SIMULATION MODEL MACHINES WITH PHASE ROTOR IN MATLAB SIMULINK

I. V. DOROSHENKO, M. N. POGULYAEV

*Educational Institution "Sukhoi State Technical University
of Gomel", the Republic of Belarus*

The article presents a mathematical model of an asynchronous machine based on differential equations, in which equations are resolved with respect to derivative flux couplings. The description of the program in the Matlab Simulink environment, which implements the described model and allows to perform modeling of transient modes of the asynchronous motor, is given. The article provides the results of experimental studies of asynchronous motor starting at sinusoidal voltage with the help of computer stand and comparison of obtained oscillograms with results of simulation according to proposed model. Comparison of experimental and calculated current oscillograms of the analysed asynchronous motor makes it possible to conclude about satisfactory accuracy of the proposed model and possibility of its application for modeling and research of asynchronous electric drives.

Keywords: asynchronous motor with phase rotor, simulation model, computer simulation, model of asynchronous machine with phase rotor, simulation of electric drive.

Введение

В инженерной практике для анализа и синтеза систем электропривода на базе асинхронных машин с управляемыми преобразователями используют математические модели, построенные на основе обобщенной двухфазной электрической машины [1]–[3]. Традиционное моделирование электроприводов производится в программных пакетах Matlab Simulink, VisSim и др., однако они составлены либо на основе двухфазной математической модели асинхронной машины, либо трехфазной математической модели двигателя в естественной системе координат, направленной

по осям фазных обмоток статора, которая справедлива только для схемы соединения обмоток статора и ротора «звезда с нейтралью» [4], [5]. Для анализа асинхронных электроприводов в программном пакете Matlab Simulink применяется базовая имитационная модель асинхронной машины с фазным ротором (АМФР), составленная на основе двухфазной асинхронной машины математической модели, которая имеет следующие недостатки:

- невозможна работа модели при разомкнутом роторе;
- двухфазная модель, на основе которой разработана базовая асинхронная машина в Matlab Simulink, неточно отражает форму, амплитуду и частоту колебательных составляющих в динамических режимах (данные параметры для моделей двухфазной и трехфазной АМФР будут различны [2]);
- неадекватно производится расчет при включении в цепь ротора силовых преобразователей (особенно если в процессе моделирования в цепи ротора возникает высокое сопротивление, что характерно при закрытых вентилях силовых преобразователей в цепи ротора).

Таким образом, актуальной является задача создания имитационной модели АМФР, которая наиболее полно отражала бы электромеханические преобразования.

Цель работы заключается в создании имитационной модели, позволяющей исследовать трехфазную АМФР при подключении в цепь ротора силовых преобразователей.

Основная часть

На основании известного математического описания асинхронной машины [1]–[3], получим систему, записанную через линейные напряжения статора (1):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\psi_A}{dt} - \frac{d\psi_B}{dt} = u_{AB} - R_1 i_A + R_1 i_B; \\ \frac{d\psi_B}{dt} - \frac{d\psi_C}{dt} = u_{BC} - R_1 i_B + R_1 i_C; \\ \frac{d\psi_C}{dt} - \frac{d\psi_A}{dt} = u_{CA} - R_1 i_C + R_1 i_A; \\ \frac{d\psi_a}{dt} = u_a - R_2 i_a; \\ \frac{d\psi_b}{dt} = u_b - R_2 i_b; \\ \frac{d\psi_c}{dt} = u_c - R_2 i_c, \end{array} \right. \quad (1)$$

где $\psi_A, \psi_B, \psi_C, R_1, i_A, i_B, i_C, u_{AB}, u_{BC}, u_{CA}$ – соответственно потокосцепления, активное сопротивление, токи и напряжения статора; $\psi_a, \psi_b, \psi_c, R_2, i_a, i_b, i_c, u_a, u_b, u_c$ – соответственно потокосцепления, приведенные к статору, активное сопротивление, токи и напряжения ротора.

Уравнения в математической модели будут разрешены относительно производных потокосцеплений. Добавив выражения для электромагнитного момента обобщенной электрической машины и уравнение механической части [1]–[3], получим систему (2):

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{d\psi_A}{dt} &= L_1 \frac{di_A}{dt} - \frac{L_{12}}{2} \frac{di_B}{dt} - \frac{L_{12}}{2} \frac{di_C}{dt} + L_{12} \cos(\varphi_{эл}) \frac{di_a}{dt} - L_{12} \sin(\varphi_{эл}) \omega_{эл} i_a + \\
 &+ L_{12} \cos\left(\varphi_{эл} - \frac{2\pi}{3}\right) \frac{di_b}{dt} - L_{12} \sin\left(\varphi_{эл} - \frac{2\pi}{3}\right) \omega_{эл} i_b + L_{12} \cos\left(\varphi_{эл} + \frac{2\pi}{3}\right) \frac{di_c}{dt} - \\
 &- L_{12} \sin\left(\varphi_{эл} + \frac{2\pi}{3}\right) \omega_{эл} i_c; \\
 \frac{d\psi_B}{dt} &= L_1 \frac{di_B}{dt} - \frac{L_{12}}{2} \frac{di_A}{dt} - \frac{L_{12}}{2} \frac{di_C}{dt} + L_{12} \cos(\varphi_{эл}) \frac{di_b}{dt} - L_{12} \sin(\varphi_{эл}) \omega_{эл} i_b + \\
 &+ L_{12} \cos\left(\varphi_{эл} - \frac{2\pi}{3}\right) \frac{di_c}{dt} - L_{12} \sin\left(\varphi_{эл} - \frac{2\pi}{3}\right) \omega_{эл} i_c + L_{12} \cos\left(\varphi_{эл} + \frac{2\pi}{3}\right) \frac{di_a}{dt} - \\
 &- L_{12} \sin\left(\varphi_{эл} + \frac{2\pi}{3}\right) \omega_{эл} i_a; \\
 \frac{d\psi_C}{dt} &= L_1 \frac{di_C}{dt} - \frac{L_{12}}{2} \frac{di_B}{dt} - \frac{L_{12}}{2} \frac{di_A}{dt} + L_{12} \cos(\varphi_{эл}) \frac{di_c}{dt} - L_{12} \sin(\varphi_{эл}) \omega_{эл} i_c + \\
 &+ L_{12} \cos\left(\varphi_{эл} - \frac{2\pi}{3}\right) \frac{di_a}{dt} - L_{12} \sin\left(\varphi_{эл} - \frac{2\pi}{3}\right) \omega_{эл} i_a + L_{12} \cos\left(\varphi_{эл} + \frac{2\pi}{3}\right) \frac{di_b}{dt} - \\
 &- L_{12} \sin\left(\varphi_{эл} + \frac{2\pi}{3}\right) \omega_{эл} i_b; \\
 \frac{d\psi_a}{dt} &= L_{12} \cos(\varphi_{эл}) \frac{di_A}{dt} - L_{12} \sin(\varphi_{эл}) \omega_{эл} i_A + L_{12} \cos\left(\varphi_{эл} + \frac{2\pi}{3}\right) \frac{di_C}{dt} - \\
 &- L_{12} \sin\left(\varphi_{эл} + \frac{2\pi}{3}\right) \omega_{эл} i_C + L_{12} \cos\left(\varphi_{эл} - \frac{2\pi}{3}\right) \frac{di_B}{dt} - L_{12} \sin\left(\varphi_{эл} - \frac{2\pi}{3}\right) \omega_{эл} i_B + \\
 &+ L_2' \frac{di_a}{dt} - \frac{L_{12}}{2} \frac{di_b}{dt} - \frac{L_{12}}{2} \frac{di_c}{dt}; \\
 \frac{d\psi_b}{dt} &= L_{12} \cos(\varphi_{эл}) \frac{di_B}{dt} - L_{12} \sin(\varphi_{эл}) \omega_{эл} i_B + L_{12} \cos\left(\varphi_{эл} + \frac{2\pi}{3}\right) \frac{di_A}{dt} - \\
 &L_{12} \sin\left(\varphi_{эл} + \frac{2\pi}{3}\right) \omega_{эл} i_A + L_{12} \cos\left(\varphi_{эл} - \frac{2\pi}{3}\right) \frac{di_C}{dt} - L_{12} \sin\left(\varphi_{эл} - \frac{2\pi}{3}\right) \omega_{эл} i_C + \\
 &+ L_2' \frac{di_b}{dt} - \frac{L_{12}}{2} \frac{di_a}{dt} - \frac{L_{12}}{2} \frac{di_c}{dt}; \\
 \frac{d\psi_c}{dt} &= L_{12} \cos(\varphi_{эл}) \frac{di_C}{dt} - L_{12} \sin(\varphi_{эл}) \omega_{эл} i_C + L_{12} \cos\left(\varphi_{эл} + \frac{2\pi}{3}\right) \frac{di_B}{dt} - \\
 &- L_{12} \sin\left(\varphi_{эл} + \frac{2\pi}{3}\right) \omega_{эл} i_B + L_{12} \cos\left(\varphi_{эл} - \frac{2\pi}{3}\right) \frac{di_A}{dt} - L_{12} \sin\left(\varphi_{эл} - \frac{2\pi}{3}\right) \omega_{эл} i_A + \\
 &+ L_2' \frac{di_c}{dt} - \frac{L_{12}}{2} \frac{di_b}{dt} - \frac{L_{12}}{2} \frac{di_a}{dt}; \\
 M &= -L_{12} p_A i_A \left[\sin(\varphi_{эл}) i_a + \sin\left(\varphi_{эл} - \frac{2\pi}{3}\right) i_b + \sin\left(\varphi_{эл} + \frac{2\pi}{3}\right) i_c \right] - \\
 &- L_{12} p_B i_B \left[\sin\left(\varphi_{эл} + \frac{2\pi}{3}\right) i_a + \sin(\varphi_{эл}) i_b + \sin\left(\varphi_{эл} - \frac{2\pi}{3}\right) i_c \right] - \\
 &- L_{12} p_C i_C \left[\sin\left(\varphi_{эл} - \frac{2\pi}{3}\right) i_a + \sin\left(\varphi_{эл} + \frac{2\pi}{3}\right) i_b + \sin(\varphi_{эл}) i_c \right]; \\
 \frac{d\omega_{эл}}{dt} &= \frac{p_A}{J} (M - M_c); \\
 \frac{d\varphi_{эл}}{dt} &= \omega_{эл},
 \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где $L_1 = L_{1\sigma} + L_{12}$ – собственная индуктивность обмотки фазы статора; $L_{1\sigma}$ – индуктивность рассеяния обмотки фазы статора; $L'_2 = L'_{2\sigma} + L_{12}$ – приведенная к статору индуктивность обмотки фазы ротора; $L'_{2\sigma}$ – приведенная к статору индуктивность рассеяния обмотки фазы ротора; $\varphi_{эл}$ – угол поворота ротора в электрических радианах; M – электромагнитный момент асинхронной машины; M_c – статический момент; J – момент инерции асинхронной машины; p_d – число пар полюсов асинхронной машины; $\omega_{эл}$ – угловая скорость ротора.

Полученные системы уравнений (1) и (2) представляют собой математическую модель трехфазной асинхронной машины с фазным ротором, в которой уравнения разрешены относительно производных потокосцеплений. Особенность разработанной имитационной модели АМФР заключается в том, что основные уравнения токов и потокосцеплений выполнены с использованием блоков библиотеки Simulink, а определение напряжений на кольцах фазного ротора производится на элементах библиотеки SimPowerSystems. Это позволяет подключать к цепи фазного ротора модели различные виды нагрузки. Для преобразования SimPowerSystems-модели в эквивалентную расчетную Simulink-модель служит блок Subsystem, содержание которого представлено на рис. 1.

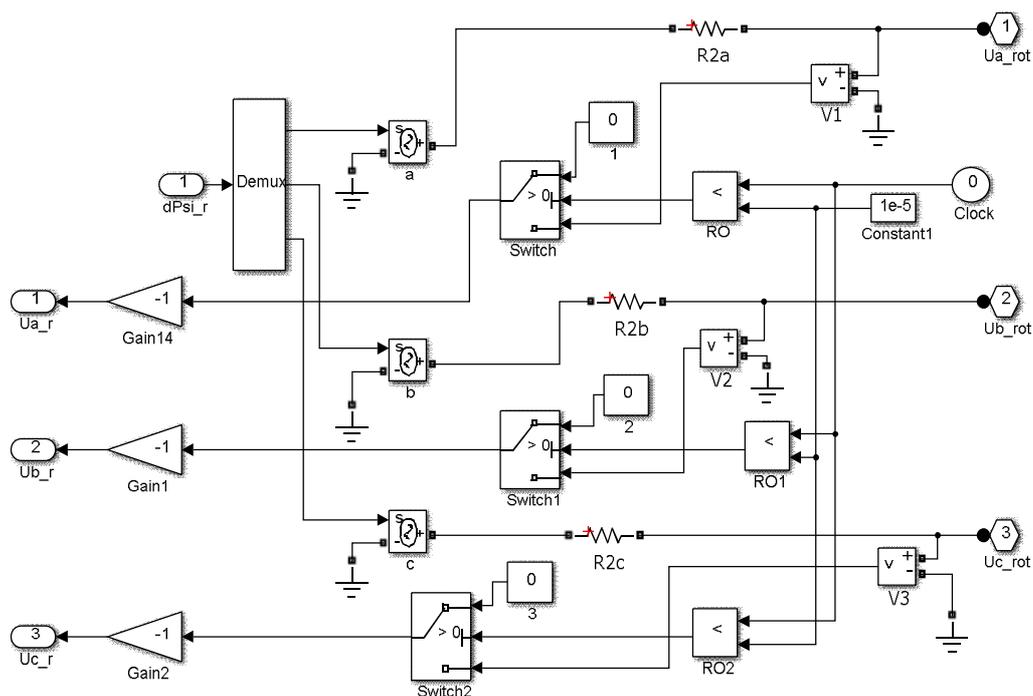


Рис. 1. Содержание блока Subsystem

На основании полученной математической модели АМФР (1) с учетом разработок подобных моделей [4], [5] и блока преобразования Subsystem (рис. 1) была разработана имитационная модель трехфазной асинхронной машины с фазным ротором в Matlab Simulink, структура которой представлена на рис. 2.

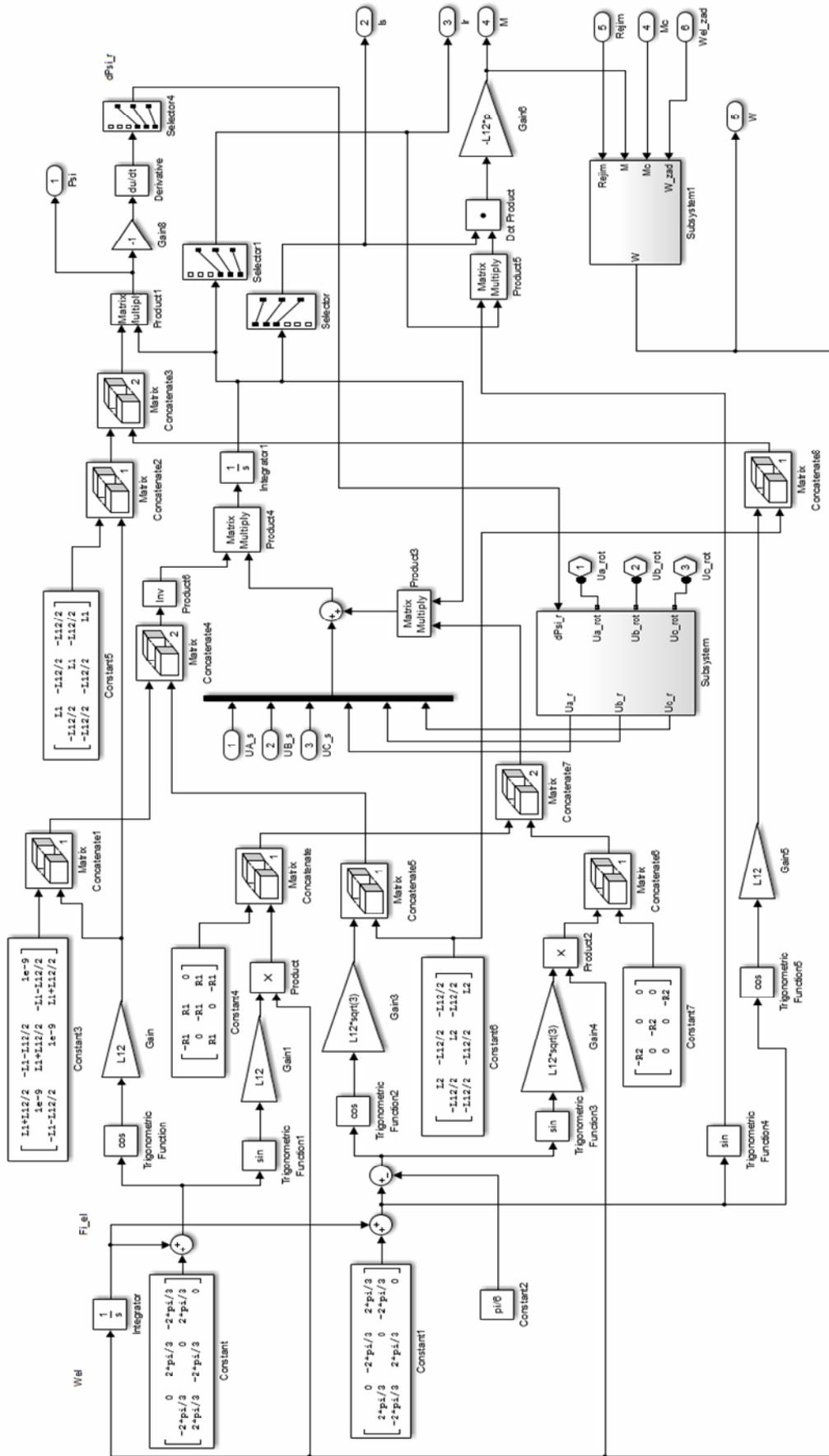


Рис. 2. Модель асинхронной машины с фазным ротором в среде Matlab Simulink

Уравнения механической части асинхронной машины представлены в модели (рис. 2) блоком Subsystem1, содержание которого представлено на рис. 3.

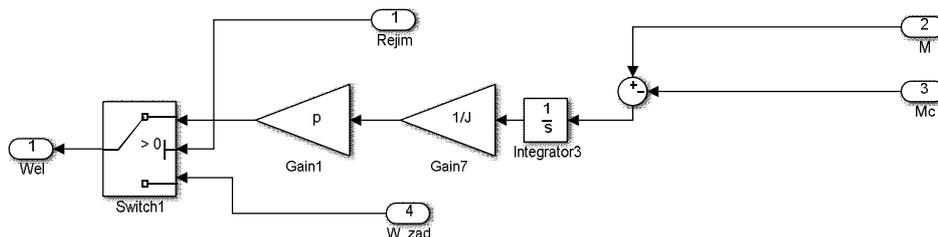


Рис. 3. Содержание блока Subsystem1

Входными воздействиями имитационной модели асинхронной машины с фазным ротором являются:

- напряжения статора;
- режим работы (двигательный, генераторный);
- момент (для двигательного режима работы) либо скорость вращения (для генераторного режима работы).

Выходными величинами модели являются:

- токи статора и ротора;
- скорость вращения;
- электромагнитный момент асинхронной машины.

На рис. 4 представлена имитационная модель АМФР (SimPowerSystems-модель) в виде собственного блока (Model AD wound rotor) с подключением указанных входных и выходных величин.

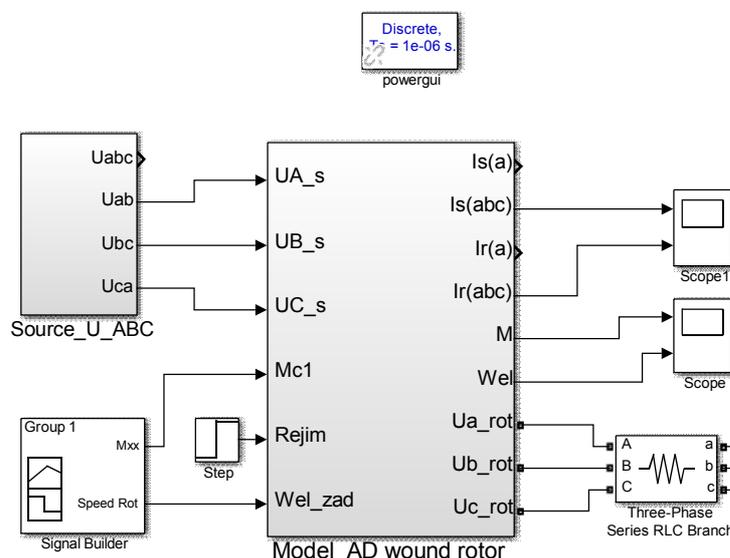


Рис. 4. Общий вид имитационной модели асинхронной машины с фазным ротором в среде Matlab Simulink

Полученная имитационная модель АМФР была апробирована для асинхронно-вентильного каскада, выполненного на основе асинхронной машины с фазным ротором МТФ112-6-У1 мощностью 5 кВт. Производились расчеты и экспериментальное исследование токов при скорости вращения 670 об/мин и момента нагрузки 25 Н · м.

Осциллограммы фазных токов статора и ротора представлены на рис. 5 и 6 соответственно.

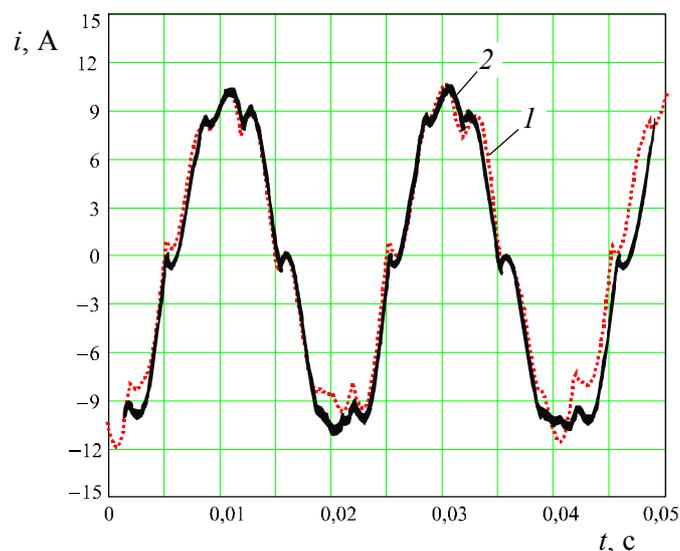


Рис. 5. Осциллограмма фазного тока статора асинхронной машины в составе асинхронно-вентильного каскада:
1 – расчет; 2 – эксперимент

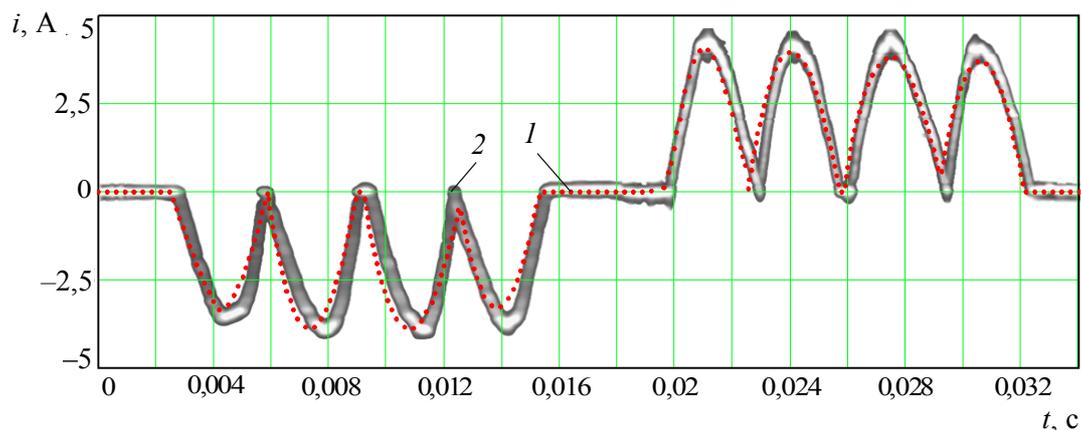


Рис. 6. Осциллограмма фазного тока ротора асинхронной машины в составе асинхронно-вентильного каскада:
1 – расчет; 2 – эксперимент

Заключение

Созданная и отлаженная имитационная модель асинхронной машины с фазным ротором позволяет производить анализ различных режимов работы асинхронной машины с фазным ротором. В процессе апробации имитационной модели было выявлено, что шаг расчета для получения адекватного результата должен иметь порядок единиц микросекунд. Данная особенность, очевидно, обусловлена тем, что при дифференцировании выражений потокосцеплений во избежание чрезмерного усложнения модели не учитывалось, что скорость вращения является функцией времени, и для получения адекватного результата частота, соответствующая шагу расчета, должна быть достаточно велика по сравнению со скоростью вращения ротора.

В результате сравнения осциллограмм экспериментальных и расчетных данных установлено: погрешность среднего значения токов составляет не более 5 %, погрешность амплитуды мгновенного значения токов статора и инвертора – около 7 %. Таким образом, представленную имитационную модель целесообразно использовать при создании имитационных моделей и проектировании промышленных электроприводов, в состав которых входят асинхронные машины с фазным ротором.

Литература

1. Чиликин, М. Г. Теория автоматизированного электропривода / М. Г. Чиликин, В. И. Ключев, А. С. Сандлер. – М. : Энергия, 1979. – 616 с.
2. Фираго, Б. И. Теория электропривода : учеб. пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск : Техноперспектива, 2004. – 527 с.
3. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин : учеб. для вузов / И. П. Копылов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 2001. – 327 с.
4. Захаренко, В. С. Особенности имитационного моделирования асинхронного двигателя для составления модели с учетом коммутации и при несимметричных схемах включения / В. С. Захаренко, И. В. Дорощенко // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2011. – № 3. – С. 66–74.
5. Дорощенко, И. В. Модель трехфазной асинхронной машины с фазным ротором в MATLAB SIMULINK / И. В. Дорощенко, В. В. Тодарев // Современные проблемы машиноведения : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому), Гомель, 22–23 нояб. 2018 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Фил. ПАО «Компания «Сухой» ОКБ «Сухого» ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – С. 159–161.
6. Shestakov, A. V. Modeling and experimental analysis of dynamic characteristics of the asynchronous motor / A. V. Shestakov // Russian Internet Journal of Electrical Engineering. – 2019. – Vol. 6, № 1. – P. 11–16.

Получено 09.03.2021 г.