

Моделирование и экспериментальное исследование динамических характеристик асинхронного двигателя*

Шестаков А.В.

Вятский государственный университет
г. Киров, Российская Федерация

AlexVS1975@yandex.ru

Аннотация. Математическое моделирование динамических режимов асинхронных машин является важнейшим инструментом как для исследования процессов, происходящих в асинхронных двигателях, так и для проектирования асинхронных электроприводов. Поэтому актуальной остается задача разработки математических моделей асинхронных машин с учетом влияния реальных факторов на параметры. В статье представлена математическая модель асинхронной машины на основе дифференциальных уравнений в ортогональной двухфазной системе координат, связанных со статором. Для учета влияния потерь в стали на взаимные индуктивности предложено использовать функции угла магнитного запаздывания. Модель также учитывает влияние вытеснения тока в стержнях ротора и влияние насыщения как по пути основного магнитного потока, так и по путям потоков рассеяния статора и ротора. Изложено описание программы для ЭВМ, 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 и частоты вращения 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, угол магнитного запаздывания, насыщение магнитной системы, эффект вытеснения тока, динамические режимы, экспериментальные исследования.

ВВЕДЕНИЕ

Математические модели асинхронных электрических машин являются важнейшим инструментом исследования переходных процессов [1-5], позволяют проектировать асинхронные электроприводы самого различного назначения [6-13], а также применяются для учебных целей [14]. Исследование динамических режимов работы трехфазных асинхронных двигателей (АД) без учета реальных факторов, таких как насыщение магнитной системы, эффект вытеснения тока в стержнях короткозамкнутого ротора, магнитных потерь в стали и других, приводит, как известно, к заметной погрешности расчета [15-17]. Поэтому возникает необходимость создания моделей динамических режимов АД с учетом названных факторов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью наших исследований был расчет переходных процессов при пуске АД с помощью разработанной ранее модели [18, 19, 22], учитывающей влияние насыщения по путям основного магнитного потока и потоков пазового рассеяния, эффекта вытеснения тока в стержнях ротора и угла магнитного запаздывания, вызванного потерями в стали, а также сопоставление данных, полученных расчетным путем, с результатами эксперимента.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В основу нашей модели АД с короткозамкнутым ротором положена система дифференциальных уравнений в двухфазной системе координат α, β , жестко связанных со статором. В данной модели [18, 19, 22] учитывается влияние вытеснения тока в обмотке ротора, насыщения и угла магнитного запаздывания, вызванного потерями в стали:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{\alpha s}}{dt} = U_{1m} \cdot \sin \omega_1 t - R_s \cdot \left(b_{11} \cdot \psi_{\alpha s} + b_{12} \cdot \psi_{\alpha r} + \right. \\ \left. + b_{13} \cdot \psi_{\beta s} + b_{14} \cdot \psi_{\beta r} \right); \\ \frac{d\psi_{\alpha r}}{dt} = -R_{r\xi} \cdot \left(b_{21} \cdot \psi_{\alpha s} + b_{22} \cdot \psi_{\alpha r} + \right. \\ \left. + b_{23} \cdot \psi_{\beta s} + \left(b_{24} + \frac{\omega_r}{R_{r\xi}} \right) \cdot \psi_{\beta r} \right); \\ \frac{d\psi_{\beta s}}{dt} = U_{1m} \cdot \cos \omega_1 t - R_s \cdot \left(b_{31} \cdot \psi_{\alpha s} + b_{32} \cdot \psi_{\alpha r} + \right. \\ \left. + b_{33} \cdot \psi_{\beta s} + b_{34} \cdot \psi_{\beta r} \right); \\ \frac{d\psi_{\beta r}}{dt} = -R_{r\xi} \cdot \left(b_{41} \cdot \psi_{\alpha s} + \left(b_{42} - \frac{\omega_r}{R_{r\xi}} \right) \cdot \psi_{\alpha r} + \right. \\ \left. + b_{43} \cdot \psi_{\beta s} + b_{44} \cdot \psi_{\beta r} \right); \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{p}{J} \cdot (M_{эм} - M_0 - M_C), \end{cases} \quad (1)$$

где $\psi_{\alpha s}, \psi_{\alpha r}, \psi_{\beta s}, \psi_{\beta r}$ – полные потокосцепления статора и ротора по оси α , статора и ротора по оси β ; U_{1m} – амплитуда напряжения обмоток; R_s – активное сопротивление статора; $R_{r\xi}$ – активное сопротивление ротора с учетом вытеснения тока; $b_{11} - b_{44}$ – коэффициенты обратной матрицы индуктивностей $\|B\|$; ω_r – угловая скорость

* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Международной научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг" (ICIE-2019), <http://icie-rus.org>

ротора; J – приведенный момент инерции ротора и нагрузочного механизма; $M_{эм} = \frac{pm_1}{2} (\psi_{\alpha s} i_{\beta s} - \psi_{\beta s} i_{\alpha s})$ – электромагнитный момент АД; $i_{\alpha s}$, $i_{\alpha r}$, $i_{\beta s}$, $i_{\beta r}$ – токи соответствующих обмоток; M_C – момент сопротивления нагрузочного механизма на валу АД; p – число пар полюсов АД. M_0 – момент холостого хода, обусловленный потерями трения в подшипниках $P_{тр,под}$, добавочными потерями в стали (поверхностными и пульсационными) $P_{доб}$ и вентиляционными потерями $P_{тр,вен}$,

$$M_0 = \frac{P_{тр,под}}{\omega_{r,ном}} + \frac{P_{доб} \cdot s^{1.5}}{\omega_{r,ном}} + \frac{P_{тр,вен} \cdot \omega_r^2}{\omega_{r,ном}^2}, \quad (2)$$

$\omega_{r,ном}$ – номинальная угловая скорость ротора; s – скольжение ротора.

Система уравнений (1) решается численным методом, при этом определяются мгновенные значения потокосцеплений, токи обмоток, электромагнитный момент, частота вращения и скольжение ротора АД.

Коэффициенты обратной матрицы индуктивностей $\|B\| = \|M^{-1}\|$ рассчитываются в аналитическом виде с использованием элементов исходной матрицы индуктивностей АД, которая равна:

$$\|M\| = \begin{pmatrix} L_{s,HC}; & M_{HC}; & -M_{\alpha\beta,HC}; & -M_{\alpha\beta,HC}; \\ M_{HC}; & L_{r\xi,HC}; & -M_{\alpha\beta,HC}; & -M_{\alpha\beta,HC}; \\ M_{\alpha\beta,HC}; & M_{\alpha\beta,HC}; & L_{s,HC}; & M_{HC}; \\ M_{\alpha\beta,HC}; & M_{\alpha\beta,HC}; & M_{HC}; & L_{r\xi,HC}. \end{pmatrix} \quad (3)$$

В (3) $L_{s,HC} = l_{s,нас} + M_{HC}$ – полная индуктивность статора с учетом влияния насыщения коронок зубцов; $L_{r\xi,HC} = l_{r\xi,нас} + M_{HC}$ – полная индуктивность ротора с учетом влияния насыщения коронок зубцов и вытеснения тока в стержнях ротора; M_{HC} – взаимная индуктивность с учетом насыщения и угла магнитного запаздывания γ ; $M_{\alpha\beta,HC}$ – взаимно-индуктивная составляющая, учитывающая влияние полей по осям α и β друг на друга при насыщении и наличии угла магнитного запаздывания.

Для учета влияния эффекта вытеснения тока в стержнях короткозамкнутых обмоток ротора на активное и индуктивное сопротивления ротора в нашей модели использовалась известная методика «Интерэлектро» [20]. По этой же методике рассчитывались индуктивности рассеяния статора и ротора с учетом насыщения коронок зубцов статора и ротора полями рассеяния.

Для расчета взаимной индуктивности M_{HC} и взаимно-индуктивной составляющей $M_{\alpha\beta,HC}$ асинхронной машины нами было введено понятие угла магнитного запаздывания [18, 22], который возникает между кривыми МДС и индукции вследствие потерь в стали, равного:

$$\gamma = \arctg\left(\frac{P_C}{P_{эм}}\right), \quad (4)$$

где P_C – суммарные потери в стали АД, $P_{эм}$ – мощность, расходуемая на изменение электромагнитной энергии АД.

Тогда взаимная индуктивность между статором и ротором с учетом влияния насыщения и угла магнитного запаздывания равна:

$$M_{HC} = \frac{M \cdot \cos \gamma}{k_\mu}, \quad (5)$$

где M – взаимная индуктивность между обмотками статора и ротора, определяемая для ненасыщенной магнитной системы; k_μ – коэффициент насыщения на пути основного магнитного потока.

Дополнительная взаимная индуктивность, которая учитывает влияние полей по ортогональным осям α и β друг на друга при насыщении, равна:

$$M_{\alpha\beta,HC} = M \cdot \frac{\sin \gamma + \xi_{\alpha\beta}}{k_\mu}, \quad (6)$$

где $\xi_{\alpha\beta}$ – критериальный коэффициент для учета взаимного влияния полей [18, 22].

В нашей модели коэффициент насыщения магнитной цепи k_μ рассчитывается аналитически с помощью характеристики намагничивания АД Φ_δ и $B_\delta = f(I_{OP})$, аппроксимированной двумя участками – прямолинейным и функцией арктангенса [18, 22]. Значение реактивной составляющей тока холостого хода I_{OP} приближенно определяется в каждый момент времени при численном решении системы (1) в виде:

$$I_{OP} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(i_{\alpha s} + i_{\alpha r})^2 + (i_{\beta s} + i_{\beta r})^2}. \quad (7)$$

На основании приведенной модели составлена программа `dvigatelproj.exe` [18, 23], позволяющая вывести на дисплей осциллограммы частоты вращения, электромагнитного момента и фазного тока (рис. 1). Также программа позволяет вывести результаты расчетов в виде таблиц в формате *.txt.

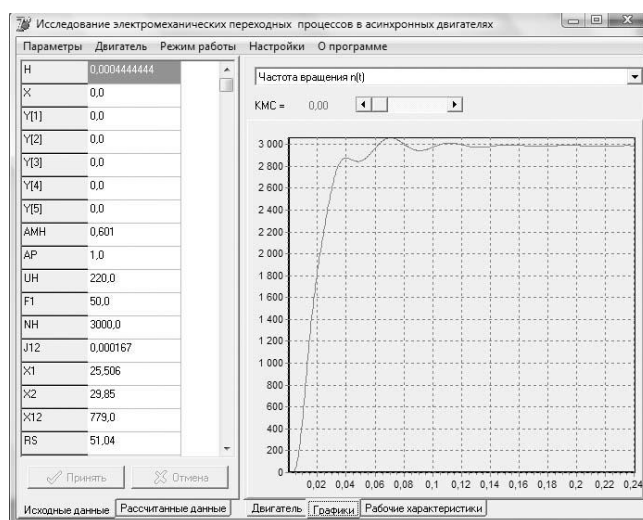


Рис. 1. Графический интерфейс программы `dvigatelproj.exe`

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПУСКЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Исследование динамических режимов выполнено на асинхронном двигателе АИР56А2У3, входящем в состав стенда САД-2 производства Уфимского института автоматики и электромеханики [18, 22]. Измерительная система стенда состоит из фотоимпульсного датчика частоты вращения, расположенного на валу агрегата, измерительных трансформаторов, датчиков напряжения и тока и универсального цифрового счетчика СЭТ4ТМ.02.0. Устройством для сопряжения стенда с ЭВМ, а также для обработки данных фотоимпульсного датчика частоты вращения является контроллер СДПТ-3, который обменивается информацией с ЭВМ с помощью интерфейса RS-232.

Программное обеспечение стенда САД-2 (Sad2.exe) позволяет формировать массив данных из мгновенных значений тока одной фазной обмотки АД и частоты вращения ротора с интервалом времени 0,001 с. Результаты экспериментов по снятию осциллограмм переходных процессов преобразуются программой Sad2.exe в графический файл в формате *.bmp.

По известным размерам, марке стали магнитопровода и обмоточным данным по методике [21] для исследуемого АД были определены параметры и построены характеристики намагничивания.

Номинальные данные исследуемого асинхронного двигателя: полезная мощность $P_{2ном} = 0,180$ кВт; синхронная частота вращения $n_1 = 3000$ мин⁻¹; напряжение фазы статора $U_{1ном} = 220$ В; активное сопротивление обмотки статора $R_1 = 51,03$ Ом; индуктивное сопротивление обмотки статора $X_1 = 25,506$ Ом; приведенное активное сопротивление обмотки ротора $R_2' = 31,95$ Ом; приведенное индуктивное сопротивление обмотки ротора $X_2' = 29,85$ Ом; сопротивление взаимной индукции $X_{12} = 474,49$ Ом; активное сопротивление цепи намагничивания $R_{12} = 7,44$ Ом; основные потери в стали статора $P_{с,осн} = 4,33$ Вт; добавочные потери в стали статора $P_{1пул} + P_{1пов} = 1,01$ Вт; добавочные потери в стали ротора $P_{2пул} + P_{2пов} = 1,74$ Вт; основные потери в магнитопроводе ротора, рассчитанные при скольжении, равном единице, $P_{ср,осн} = 7,07$ Вт; механические потери $P_{мех} = 5,64$ Вт; момент инерции ротора $J = 1,67 \cdot 10^{-4}$ кг·м².

Характеристики намагничивания аппроксимированы следующими зависимостями:

$$\begin{cases} \Phi_{\delta} = 0,005875 \cdot I_{0P} & \text{при } I_{0P} \leq 0,2 \text{ А;} \\ \Phi_{\delta} = 0,0012 \cdot \arctg(0,011 \cdot W_1 \cdot I_{0P}) & \text{при } I_{0P} > 0,2 \text{ А;} \\ B_{\delta} = 2,595 \cdot I_{0P} & \text{при } I_{0P} \leq 0,2 \text{ А;} \\ B_{\delta} = 0,53 \cdot \arctg(0,011 \cdot W_1 \cdot I_{0P}) & \text{при } I_{0P} > 0,2 \text{ А,} \end{cases} \quad (8)$$

где $W_1 = 676$ – число витков обмотки статора.

Ненасыщенное значение сопротивления взаимной индукции, определенное с помощью коэффициента насыщения, рассчитанного по характеристике намагничивания через магнитные потоки при номинальном токе, составило $X_{12,Н} = k_{\mu} \cdot X_{12} = 1,642 \cdot 474,49 = 779$ Ом.

С помощью программы dvigatelproj.exe [18, 23] выполнено моделирование пуска асинхронного двигателя в режиме холостого хода при условии, что температура обмоток равна расчетной (50°C). Результаты моделирования приведены на рис. 2 и рис. 3.

Результаты эксперимента на стенде САД-2 приведены на рис. 4. Масштаб времени на рис. 4 – 60 мс в одном делении, масштаб тока – 1 А/дел, масштаб угловой скорости – 100 с⁻¹/дел.

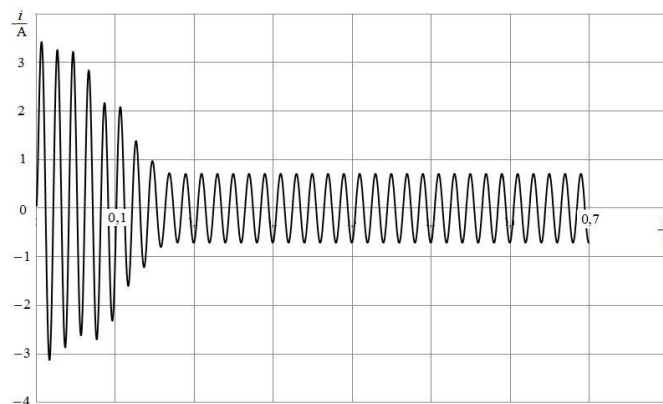


Рис. 2. Осциллограмма тока исследуемого асинхронного двигателя, полученная с помощью модели

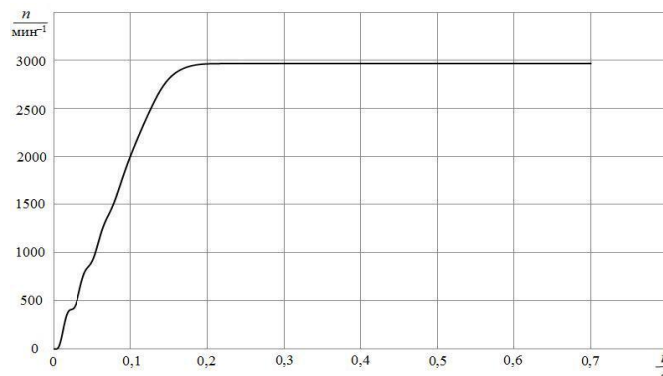


Рис. 3. Осциллограмма частоты вращения исследуемого асинхронного двигателя, полученная с помощью модели

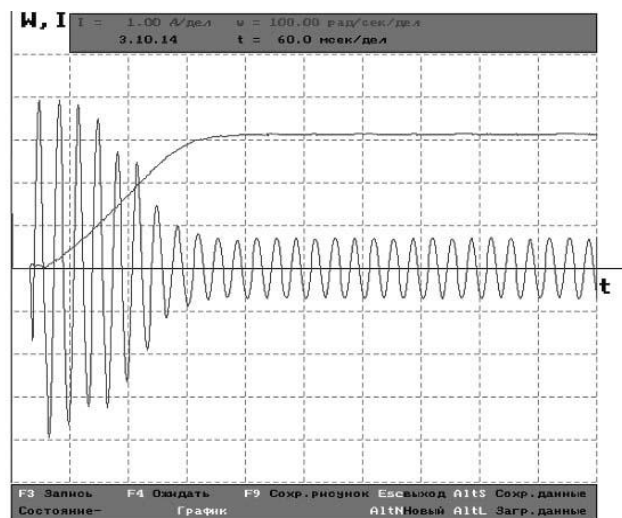


Рис. 4. Экспериментальные зависимости тока статора и частоты вращения, снятые с помощью стенда САД-2

ВЫВОДЫ

Отличия экспериментальных и расчетных ударных и установившихся токов, частоты вращения, времени пуска не превышают 10 – 12%, что можно считать удовлетворительным результатом и говорить о достаточно высокой точности предложенной модели и возможности ее использования для исследования короткозамкнутых асинхронных двигателей и электроприводов различного назначения.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор выражает благодарность студентам ВятГУ специальности “Электромеханика” (выпуск 2015 года) А.Л. Машанову и В.П. Чегосову за участие в проведение экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Moshchinskij Yu.A. Mathematical model for asynchronous motor investigations during stopway / Yu.A. Moshchinskij, A.P. Petrov // *Электротехника*. – 2004. – №1. – с. 19-23.
2. Khrisanov V.I. Mathematical model of asynchronous motors in stator phase axis // *Электротехника*. – 2004. – №7. – С. 23-31.
3. Pustovetov M.Yu. A mathematical model of the three-phase induction motor in three-phase stator reference frame describing electromagnetic and electromechanical processes // *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*, IEEE Xplore Digital Library (Omsk, 15-17 Nov. 2016). – 2016. – P. 1-5.
4. Martin Kral. Dynamic model of asynchronous machine / Martin Kral, Radomir Gono // 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou (Czech Republic, 17-19 May 2017), IEEE Xplore Digital Library. – 2017. – P. 1-4.
5. Kosmatov V.I. Mathematical model of energy-saving asynchronous motor in the rotating coordinates system / V.I. Kosmatov, A.S. Sarvarov, E.I. Danilov // 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED) (Ekaterinburg, 26-30 March 2018), IEEE Xplore Digital Library. – 2018. – P. 1-5.
6. Решмин Б.И. Уточненная модель асинхронного двигателя как объект для построения системы управления // *Электротехника*. – 2005. – №7. – С. 14-19.
7. Омельченко Е.Я. Математическая модель трёхфазного асинхронного двигателя с фазным ротором // *Электротехника*. – 2007. – №11. – С. 19-24.
8. Богуславский И.З. Метод расчета поверхностного эффекта в стержне клетки ротора с учетом изменения в нем температуры при пуске // И.З. Богуславский, М.В. Кришьянис // *Электротехника*. – 2008. – №3. – С. 24-30.
9. Герман-Галкин С.Г. Аналитическое и модельное исследование асинхронной машины с фазным ротором при положительных скольжениях // *Электротехника*. – 2015. – №7. – С. 58-65.
10. Александров А.В. Моделирование электромагнитных процессов в асинхронного тяговом электроприводе автоматического электрического торможения электропоезда / А.В. Александров, И.П. Киселев, Е.И. Макарова // *Электротехника*. – 2016. – №5. – С. 20-24.
11. Meiyang Zuo, Hui Guo. Integrative modeling and simulation analysis of asynchronous motor and control system / Meiyang Zuo, Hui Guo // *International Conference on Elec-*

trical Machines and Systems (ICEMS), IEEE Xplore Digital Library. – 2011. – 3. 1-6.

12. Huang Xuan. Modeling and simulation of vector control and variable-frequency regulating speed system of asynchronous motor based on Matlab / Huang Xuan, Huang Yu. // *International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)* (XianNing, 16-18 April 2011). – 2011. – P. 2334-2337.

13. Considerations regarding modeling simulation and monitoring of dynamic regimes for asynchronous motors / A. Enache, S. Enache, A. Campeanu, T. Cimpanu // *Electrical and Power Engineering (EPE) International Conference and Exposition*. – 2014. – P. 299-304.

14. Pau Casals-Torrens Virtual Laboratory for Learning Asynchronous Motors in Engineering Degrees // *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologias del Aprendizaje*. – 2013 – Vol. 8, Issue 2. – P. 71-76.

15. Seman S. Dynamic model of cage induction motor considering saturation and skin effect / S. Seman, J. Saitz, A. Arkkio // *Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems ICEMS* (Beijing, China, 19-11 Nov. 2003). – 2003. – Vol. 2. – P. 710-713.

16. Денисов В.А. Сравнительный анализ переходных процессов в асинхронном электродвигателе / В.А. Денисов, М.Н. Третьяков, О.А. Бородин // *Электротехника*. – 2018. – №3. – С. 2-7

17. Математическое моделирование линейного асинхронного двигателя на основе детализированных схем замещения / Ф.Н. Сарапулов, В.Э. Фризен, Е.Л. Швыдкий, И.А. Смольянов // *Электротехника*. – 2018. – №4. – С. 58-53.

18. Шестаков А.В. Электронный симулятор стенда «Исследование трехфазного асинхронного двигателя» // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2013. – №4. – С. 70-76.

19. Шестаков А.В. Моделирование процессов управления асинхронным двигателем в пульсирующем режиме с учетом влияния реальных факторов / А.В. Шестаков, А.А. Фоминых // *Динамика систем, механизмов и машин: сборник трудов XI Международной научно-техн. конф.* (Омск, 14-16 ноября 2017). – Омск, ОмГТУ, 2017. – т. 5, №3. – С. 134-139.

20. Радин В.И. Унифицированная серия асинхронных двигателей «Интерэлектро». / В.И. Радин, И. Лондин, В.Д. Розенкоп. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.

21. Проектирование электрических машин. – 4-е изд., перераб. и доп. / И.П. Копылов и др. – Москва: Юрайт, 2015. – 766 с.

22. Шестаков А.В. Экспериментальное исследование параметров и характеристик асинхронного двигателя при синусоидальном напряжении / А.В. Шестаков, В.В. Желнин, Р.Н. Исмиев // *Общество, наука, инновации (НПК-2014): сб. материалов ежегод. Открыт. Всерос. науч.-практ. конф.* (Киров, 16-25 апр. 2014). – Киров, 2014. – с. 2027-2029.

23. Шестаков А.В., Максимов В.В. Электронный симулятор лабораторного стенда «Исследование трехфазного асинхронного двигателя» // *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011614910 Рос. Федерация; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО «ВятГУ».* зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 22.06.2011.

Modeling and experimental analysis of dynamic characteristics of the asynchronous motor

Shestakov A.V.

Vyatka State University
Kirov, Russian Federation
AlexVS1975@yandex.ru

Abstract. Mathematical modeling of dynamic modes of asynchronous machines is an important tool for the study of processes occurring in asynchronous motors as well as for the design of asynchronous drives. Therefore, the problem of developing of mathematical models of asynchronous machines taking into account the influence of real factors on the parameters remains relevant. The article presents the mathematical model of asynchronous machine based on differential equations in an two-phase orthogonal coordinate system associated with the stator. To take into account the influence of iron losses on mutual inductances, it is proposed to use the functions of the magnetic lag angle. The model also takes into account the influence of current displacement in the rotor bars and the influence of saturation as the main magnetic flux path and the paths of the stator and rotor leakage fluxes. The description of the computer program that implements the model and allows to simulate transients of the asynchronous motor is present. The results of experimental studies of the asynchronous motor start under sinusoidal voltage using a computer stand, and comparison of the oscillograms obtained with simulation results of the proposed model are presented. The comparison of experimental and calculated oscillograms of the current and rotation speed of the investigated asynchronous motor can be concluded on satisfactory accuracy of the proposed model and the possibility of its application for modeling and analysis of asynchronous electric drives.

Keywords: asynchronous motor, magnetic lag angle, the saturation of the magnetic system, the effect of the current displacement, dynamic modes, experimental analysis.

REFERENCES

1. Moshchinskii Yu.A., Petrov A.P. Mathematical model for asynchronous motor when running down, *Russian Electrical Engineering*, vol. 75, no.1, 2004, pp. 26-30.
2. Khrisanov V.I. Mathematical model of asynchronous machines in the stator-phase reference frame, *Russian Electrical Engineering*, vol. 75, no.7, 2007, pp. 27-37.
3. Pustovetov M.Yu. A mathematical model of the three-phase induction motor in three-phase stator reference frame describing electromagnetic and electromechanical processes, *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*, IEEE Xplore Digital Library, Omsk, Russia, 2016, pp. 1-5. DOI: 10.1109/dynamics.2016.7819069
4. Martin Kral, Radomir Gono. Dynamic model of asynchronous machine, *18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, IEEE Xplore Digital Library, Kouty nad Desnou, Czech Republic, 2017, pp. 1-4. DOI: 10.1109/epe.2017.7967320
5. Kosmatov V.I., Sarvarov A.S., Danilov E.I. Mathematical model of energy-saving asynchronous motor in the rotating coordinates system, *17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED)*, IEEE Xplore Digital Library, Ekaterinburg, Russia, 2018, pp. 1-5. DOI: 10.1109/aced.2018.8341702
6. Reshmin B.I. Improved asynchronous-motor model for control systems, *Russian Electrical Engineering*, vol. 76, no.7, 2007, pp. 17-23.
7. Omel'chenko E.Y. Mathematical model of the wound-rotor three-phase induction motor, *Russian Electrical Engineering*, vol. 78, no. 11, 2007, pp. 580-585. DOI: 10.3103/s1068371207110041
8. Boguslavskii I.Z., Krish'yaniy M.V. Method of calculation of the skin effect in the rotor chamber bar with regards to temperature variations at start-up, *Russian Electrical Engineering*, vol. 79, no.3, 2008, pp. 136-141. DOI: 10.3103/s106837120803005x
9. German-Galkin S.G. An analytic and simulation study of a wound-rotor asynchronous machine at positive slides, *Russian Electrical Engineering*, vol. 86, no.7, 2015, pp. 418-424. DOI: 10.3103/s1068371215070056
10. Aleksandrov A.V., Kiselev I.P., Makarova E.I. Simulations of electromagnetic processes in an asynchronous traction drive of automatic electric braking of an electric train, *Russian Electrical Engineering*, vol. 87, no. 5, 2016, pp. 256-259. DOI: 10.3103/s1068371216050035
11. Meiyang Zuo , Hui Guo. Integrative modeling and simulation analysis of asynchronous motor and control system, *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, IEEE Xplore Digital Library, 2011, pp. 1-6. DOI: 10.1109/icems.2011.6073845
12. Huang Xuan, Huang Yu. Modeling and simulation of vector control and variable-frequency regulating speed system of asynchronous motor based on Matlab, *International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)*, XianNing, 2011, pp. 2334-2337. DOI: 10.1109/cecnet.2011.5768893
13. Enache M.-A., Enache S., Campeanu A., Cimpanu T. Considerations regarding modeling simulation and monitoring of dynamic regimes for asynchronous motors, *Electrical and Power Engineering (EPE) International Conference and Exposition*, 2014, pp. 299-304. DOI: 10.1109/icepe.2014.6969917
14. Pau Casals-Torrens Virtual Laboratory for Learning Asynchronous Motors in Engineering Degrees, *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologias del Aprendizaje*, 2013, Vol. 8, Issue 2, pp. 71-76. DOI: 10.1109/rita.2013.2258234
15. S. Seman, J. Saitz, A. Arkkio "Dynamic model of cage induction motor considering saturation and skin effect", *Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems*

ICEMS 2003, 19-11 Nov. 2003, Beijing, China, Vol. 2, pp. 710-713.

16. Denisov V.A., Tret'yakova M.N., Borodin O.A. A Comparative analysis of transient processes in an asynchronous motor, *Russian Electrical Engineering*, vol. 89, no.3, 2018, pp. 137-142. DOI: 10.3103/s1068371218030070

17. Sarapulov F.N., Frizen V.E., Shvydkiy E.L., Smol'yanov I.A. Mathematical Modeling of a Linear-Induction Motor Based on Detailed Equivalent Circuits, *Russian Electrical Engineering*, vol. 89, no.4, 2018, pp. 270-274. DOI: 10.3103/s1068371218040119

18. Shestakov A.V. Electronic stand simulator Analysis of three-phase induction motor, [Elektronniy simulyator stenda Issledovaniye tryokhfaznogo asinkhronnogo dvigatelya] *Russian Electromechanics. Universities' News [Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika]*, no.4, 2013, pp.70-76. (in Russ.)

19. Shestakov A.V. Fominykh A.A. Modeling of control processes of the asynchronous motor under pulsating mode with due regard for the influence of real factors, *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines" (Dynamics)*, *IEEE Xplore Digital Library*, Omsk, Russia, 2017, pp. 1-6. DOI: 10.1109/dynamics.2017.8239507

20. Radin V.I., Londin I., Rozenkop V.D. *Unifitsirovannaya seriya asinkhronnykh dvigatelyei "Interelectro"* [Unified

series of asynchronous motors "Interelectro"], Moscow, Energoatomizdat, 1990, 416 p. (in Russ.)

21. Kopylov I.P., Klokov B.K., Morozkin V.P., Tokarev B.F. *Proyektirovaniye elektrycheskykh mashin* [The design of electric machines], Moscow, Yurait Publisher, 2015, 766 p. (in Russ.)

22. Shestakov A.V., Zhelnin V.V., Ismiev R.N. Experimental study of parameters and characteristics of an asynchronous motor under sinusoidal voltage [Eksperimental'noe issledovanie parametrov i kharakteristik asinkhronnogo dvigatelya pri sinusoidal'nom napryazhenii], *Obshchestvo, nauka, innovatsii (NPK-2014): sb. materialov ezhegod [Society, Science, Innovations (NPK-2014): Sat. materials annually. Opened All-Russia. scientific-practical conf.]* (Kirov, 16-25 April 2014), Kirov, 2014, pp. 2027-2029. (in Russ.)

23. Shestakov A.V., Maksimov V.V. *Elektronnyy simulyator laboratornogo stenda "Issledovanie trekhfaznogo asinkhronnogo dvigatelya"* [Electronic simulator of the laboratory stand "Investigation of a three-phase asynchronous motor"], Certificate of state registration of the computer program №2011614910 Ros. Federation; applicant and rightholder of VyatGU. registered in the registry of computer programs 22.06.2011. (in Russ.)

Библиографическое описание статьи

Шестаков А.В. Моделирование и экспериментальное исследование динамических характеристик асинхронного двигателя // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2019. – Т.6, №1. – С. 11-16. DOI: 10.24892/RIJEE/20190102

Reference to article

Shestakov A.V. Modeling and experimental analysis of dynamic characteristics of the asynchronous motor, *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2019, vol.6, no.1, pp. 11-16. DOI: 10.24892/RIJEE/20190102