

Исследование моделей вентильно-индукторного двигателя

АНТИПОВ В.Н., ГРОЗОВ А.Д., ИВАНОВА А.В.

Для эффективного проектирования, исследования и регулирования вентильно-индукторных двигателей разработаны и предложены три типа моделей ВИД в среде MATLAB/Simulink. Модели дают возможность совершенствовать процедуру проектирования, рационально выбирать параметры регулирования (I_{ref} , θ_{on} , θ_{off} , ω , M_{load}) и получать динамику изменения основных параметров двигателя в различных режимах. Показаны возможности расчета и исследования на примере вентильно-индукторного двигателя ВИД-3,5-1130 с отношением зубцов статора и ротора 6/4. Модели учитывают возможное насыщение двигателя. Для расчета токов и вращающих моментов используются блоки Look-Up Table, а для алгоритмов регулирования – блоки Matlab Function. Модели дают возможность совершенствовать процедуру проектирования, рационально выбирать параметры регулирования и изучать динамику поведения двигателя в различных режимах. С помощью замены исходных данных в блоках Look-Up Table и *m*-файлов в блоках Matlab Function возможно моделирование вентильно-индукторных двигателей с различным отношением зубцов статора и ротора.

К л ю ч е в ы е с л о в а: вентильно-индукторный электродвигатель, конфигурация магнитопровода, моделирование, проектирование

Известно, что реактивный регулируемый привод (РРП) на базе вентильно-индукторного двигателя (ВИД) обладает весьма привлекательными достоинствами, но требует немало усилий для решения задачи по созданию индукторной машины с высокими техническими показателями [1–4]. Невершенство процедуры проектирования является одной из причин, ограничивающих перспективы применения РРП с ВИД, в том числе и на городском транспорте, где его преимущества очевидны [5–7]. Включение в процедуру проектирования ВИД математического блочного визуально-ориентированного моделирования в матричной системе MATLAB с пакетами расширения Simulink и SimPowerSystems открывает обширные возможности для эффективного проектирования [8, 9].

В статье представлены три типа моделей, созданных авторами в среде MATLAB/SIMULINK (рис. 1), а также показаны возможности расчета и исследования на примере вентильно-индукторного двигателя ВИД-3,5-1130 (3,5 кВт, 550 В, 1130 мин⁻¹) с отношением зубцов статора и ротора 6/4 [6, 10].

Для первого типа модели (рис. 1,а) заданными параметрами являются: напряжение U , ограничение тока I_{ref} , частота вращения двигателя n , углы включения θ_{on} и отключения фаз θ_{off} . Моделированием определяется вращающий момент двигателя M_{el} . Модель предназначена для проектирования двигателя и расчета различных режимов его работы. Блок, обозначенный как Subsystem1(2,3), пред-

ставляет модель одной фазы двигателя (рис. 2) и является одинаковым для всех трех моделей.

Для второго типа модели (рис. 1,б) заданными параметрами являются: напряжение U , ограничение тока I_{ref} , момент нагрузки M_{load} , углы включения θ_{on} и отключения фаз θ_{off} . Моделированием определяется частота вращения двигателя n . Модель полезна при исследовании регулирования частоты вращения ВИД.

Для третьего типа модели (рис. 1,в) заданными параметрами являются: напряжение U , ограничение тока I_{ref} , момент нагрузки M_{load} , частота вращения n , углы включения θ_{on} и отключения фаз θ_{off} . Моделированием определяется электромагнитный вращающий момент двигателя при заданной частоте вращения.

Схема моделирования одной фазы реализует решения уравнения для цепей обмоток двигателя

$$u_j = r_{ph} i_j + \frac{d\psi_j(i, \theta)}{dt} \quad (1)$$

и определяет момент $M_j(i, \theta)$ через коэнергию $W_{co}(i, \theta)$:

$$M_j(i, \theta) = \left. \frac{dW_{co}(i, \theta)}{d\theta} \right|_{i=\text{const}}, \quad (2)$$

где i_j – мгновенное значение тока фазы; r_{ph} – сопротивление фазы; ψ – потокосцепление; θ – угол рассогласования положения ротора и статора; u_j – напряжение фазы в зависимости от угла θ :

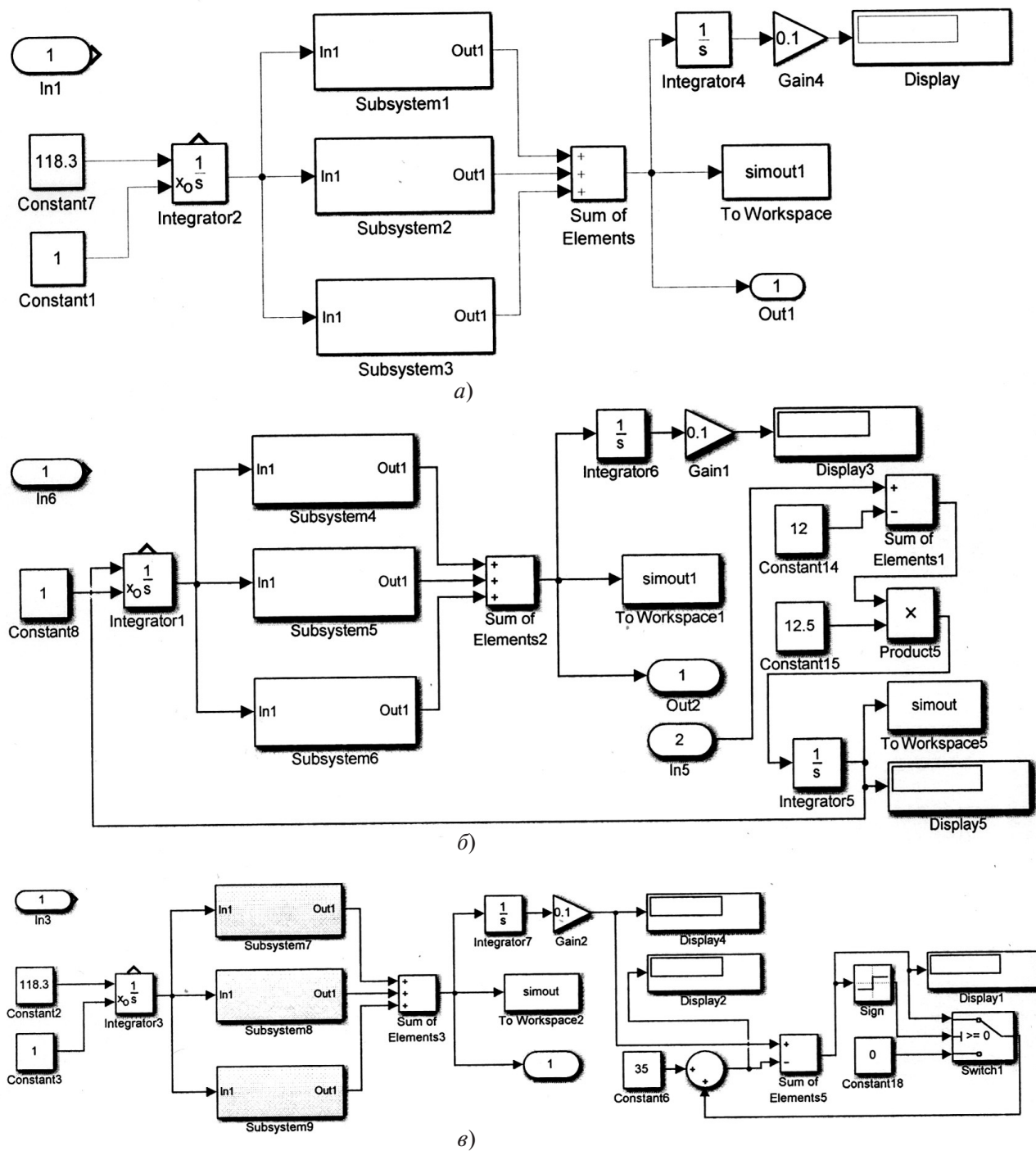


Рис. 1. Три типа модели для исследования вентильно-индукторных двигателей: *a* – определение электромагнитного момента; *б* – определение частоты вращения; *в* – определение момента нагрузки

$$\begin{aligned}
 u_j &= U_{dc}; \quad \theta_{on} \leq \theta \leq \theta_{off}; \\
 u_j &= -U_{dc}; \quad \theta_{off} \leq \theta \leq \theta_{ent}; \\
 u_j &= 0; \quad \theta \geq \theta_{ent}.
 \end{aligned}
 \quad (3)$$

Для моделирования нелинейной задачи необходимы численные данные для двух блоков двумерных таблиц. В блоке *Look-Up Table* должны быть записаны данные тока в зависимости от потокосцепления и угла рассогласования $i = f(\psi, \theta)$. Обычно

путем численного решения задачи электромагнитного поля определяется потокосцепление и представляется в виде двумерной таблицы как функция дискретных значений токов фазы и углов рассогласования $\psi = f(i, \theta)$ [1–4] (указанные зависимости для ВИД-3,5-1130 показаны на рис. 3). Необходимое для моделирования обратное преобразование (рис. 4) выполняется средствами MATLAB путем создания специального *m*-файла.

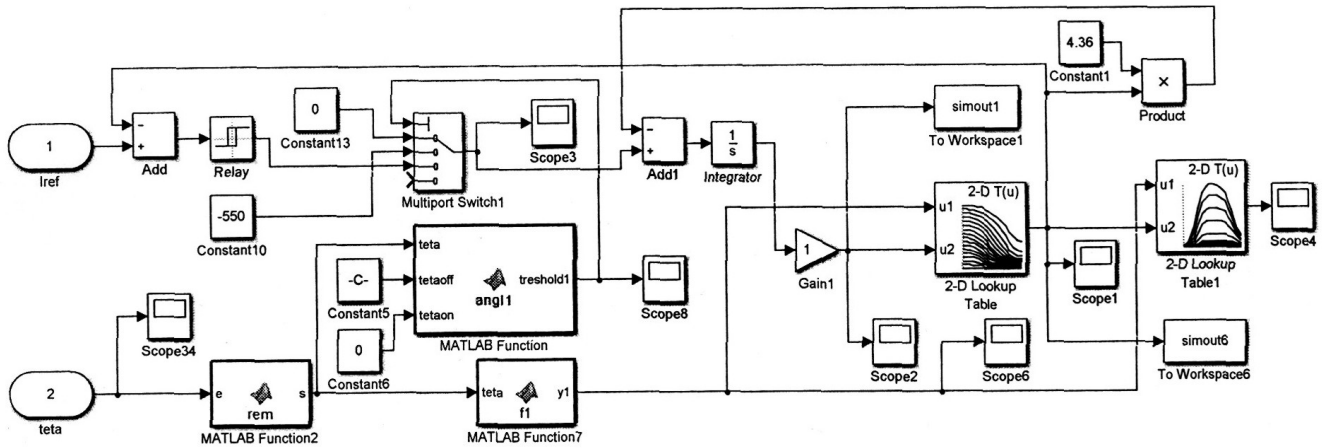


Рис. 2. Модель одной фазы вентильно-индукторного двигателя

В блоке *Look-Up Table 1* должны быть записаны данные момента в зависимости от фазного тока и угла рассогласования. Задача решается также созданием *m*-файла Matlab, в котором по зависимости $\psi = f(i, \theta)$ находится коэнергия

$$W_{co}(i, \theta) = \int_0^{i_a} \psi(i, \theta_0) di \quad (4)$$

и определяется ее градиент. Соответствующие графики показаны на рис. 5 и 6.

В схеме моделирования предусмотрены три блока заданий функций *Matlab Function*. Блок *Matlab*

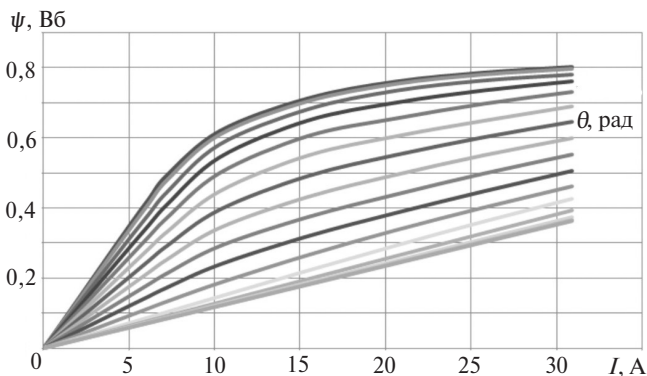


Рис. 3. Зависимость потокоцепления от тока $\psi = f(I)$ при различных положениях ротора θ для ВИД-3,5-1130

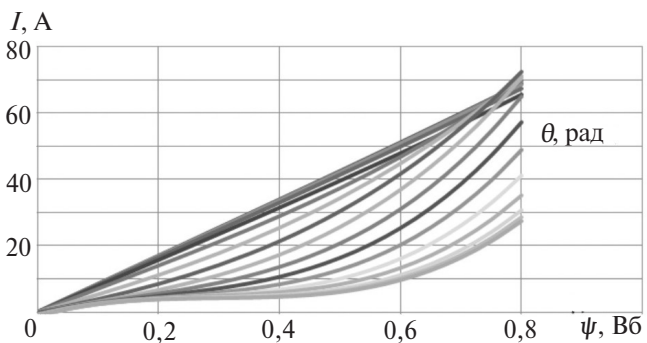


Рис. 4. Зависимость тока от потокоцепления $I = f(\psi)$ при различных положениях ротора θ для ВИД-3,5-1130

Function 2 с помощью функции *rem* (остаток после деления) преобразует непрерывную функцию угла поворота ротора в функцию угла поворота в пределах от 0 до $\pi/2$ [8].

Блок *Matlab Function 7* – с помощью созданного *m*-файла для каждой фазы значения угла поворота преобразуются из диапазона $0-\pi/2$ к диапазону $0-\pi/4$, для которого записаны двумерные таблицы блоков *Look-Up Table* и *Look-Up Table 1*.

Блок *Matlab Function* с помощью *m*-файла для каждой фазы обеспечивает переключение сигналов W_{co} , Вб·А

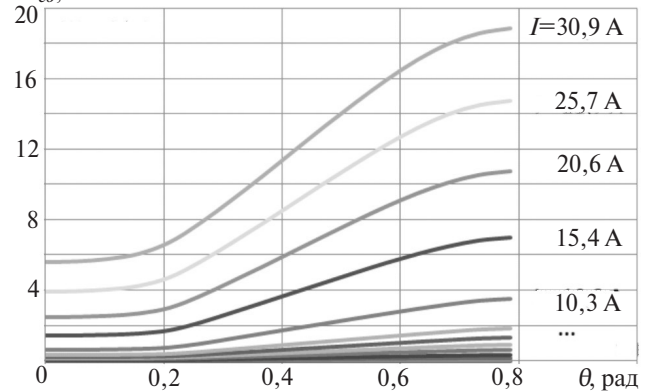


Рис. 5. Коэнергия $W = f(\theta)$ при различных значениях тока для ВИД-3,5-1130

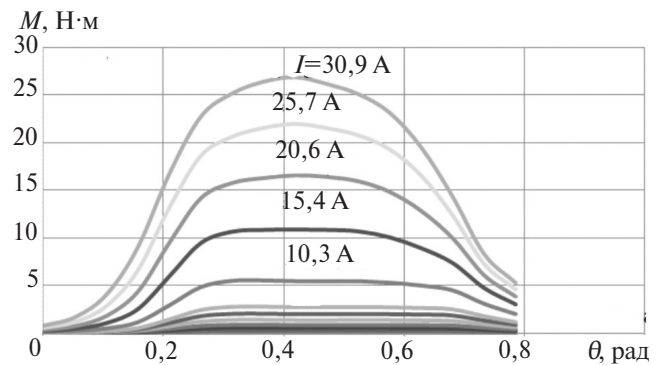


Рис. 6. Момент $M = f(\theta)$ при различных значениях тока для ВИД-3,5-1130

в многопортовом переключателе в соответствии с (3).

С помощью блоков математической обработки сигнала определены действующие значения тока фазы и среднее значение момента двигателя, которые выведены на экран виртуального дисплея. Для последующего анализа данные фазного тока, потокосцепления и вращающего момента сохранены в рабочем пространстве с помощью блоков *simout*.

Возможности моделирования по схеме на рис. 1,а представлены на рис. 7 как зависимости электромагнитного момента ВИД-3,5-1130 от угла закрытия транзисторов для режимов без токоограничения и с токоограничением ($I_{ref} = 30$ А).

Во второй схеме моделирования (рис. 1,б) предусмотрен блок для решения уравнения движения

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{el}(i, \theta) - M_{load}, \quad (5)$$

из которого определяется угловая частота вращения

$$\omega = \frac{1}{J} \int (M_{el}(i, \theta) - M_{load}) dt, \quad (6)$$

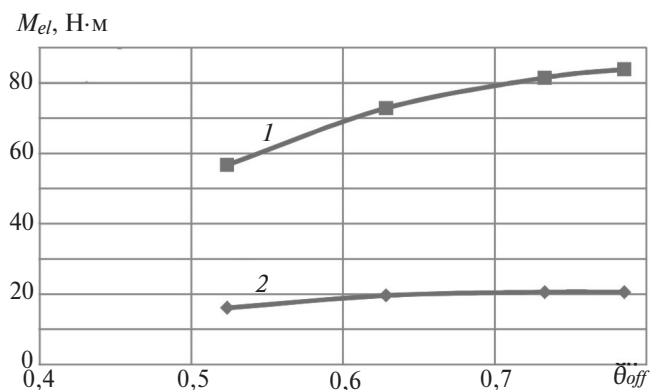


Рис. 7. Зависимость момента от угла закрытия $M = f(\theta_{off})$ для $U = 550$ В, $\omega = 118,3$ рад/с, $\theta_{on} = 0$: 1 – без токоограничения; 2 – при $I_{ref} = 30$ А

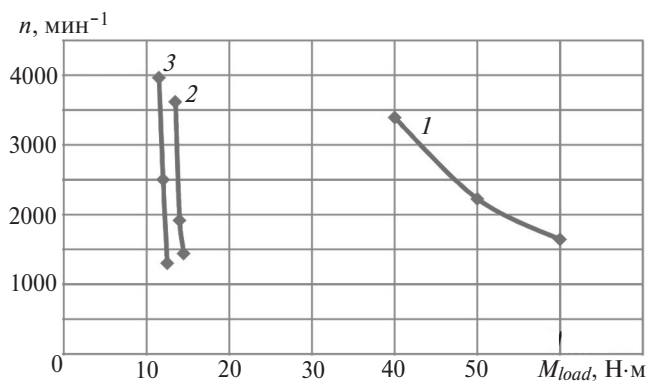


Рис. 8. Зависимость частоты вращения от момента нагрузки $n = f(M_{load})$ для $U = 550$ В, $\theta_{on} = 0$: 1 – без токоограничения для $\theta_{off} = \pi/5$; 2 – $I_{ref} = 30$ А для $\theta_{off} = \pi/5$; 3 – $I_{ref} = 30$ А для $\theta_{off} = \pi/6$

где M_{load} – момент нагрузки; J – момент инерции привода.

На рис. 8 такие зависимости представлены по результатам моделирования ВИД-5,5-1130 для режимов без токоограничения при угле закрытия транзисторов $\theta_{off} = \pi/5$ и с токоограничением 30 А при углах закрытия транзисторов $\theta_{off} = \pi/5$ и $\theta_{off} = \pi/6$.

Моделирование по третьей схеме (рис. 1,в) дает возможность получить зависимости частоты вращения от момента нагрузки. В схеме моделирования предусмотрен блок для решения уравнения

$$M_{mean}(i, \theta) - M_{load} = \Delta M. \quad (7)$$

В результате моделирования получены зависимости электромагнитного момента от токоограничения, представленные на рис. 9.

Таким образом, три типа моделей ВИД в среде MATLAB/Simulink дают возможность, с одной стороны, на стадии проектирования не только правильно определить вращающий электромагнитный момент двигателя, но и рационально выбрать параметры регулирования (I_{ref} , θ_{on} , θ_{off} , ω , M_{load}), с другой стороны, – получить динамику изменения основных параметров двигателя. В качестве примера на рис. 10 показаны мгновенные значения напряжения, тока и вращающего момента ВИД-3,5-1130 в номинальном режиме.

По представленным моделям выполнено сравнение результатов моделирования с экспериментом. Эксперимент проведен на вентильно-индукторном двигателе ВИД-3,5-1130 при отладке системы управления реактивным регулируемым электроприводом. Отладка проводилась при уровне напряжения питания 300 В и при токоограничении $I_{ref} = 10$ А. В таблице приведены экспериментальные данные трех режимов, отличающихся углами закрытия управляющих ключей, и расчетные данные, полученные на трех вышеописанных моделях. Сравнение подтверждает работоспособность разработанных моделей.

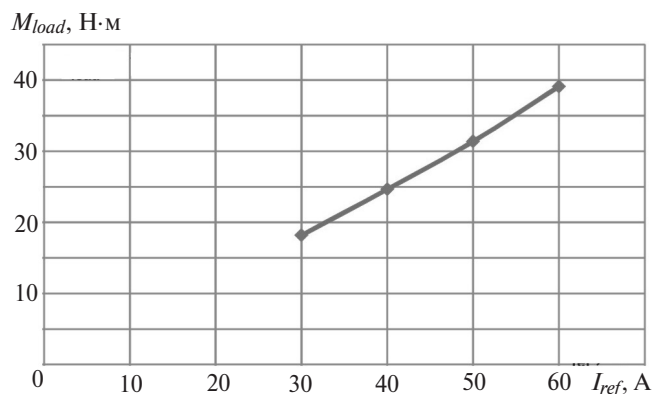


Рис. 9. Зависимость момента нагрузки от токоограничения $M_{load} = f(I_{ref})$ для $U = 550$ В, $\omega = 118,2$, $\theta_{on} = 0$, $\theta_{off} = \pi/5$

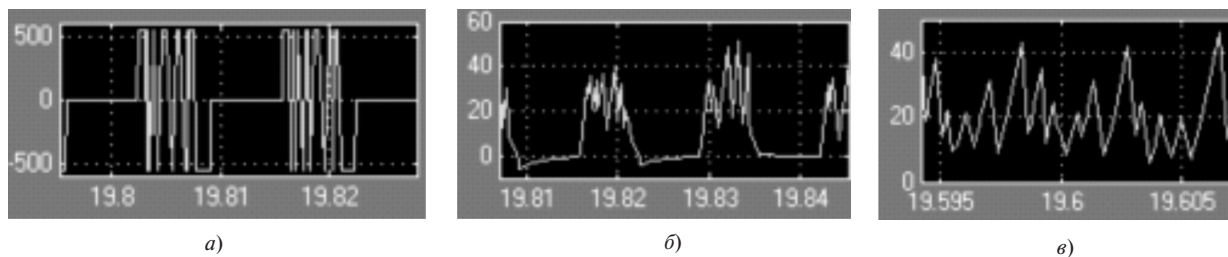


Рис. 10. Мгновенные значения напряжения, тока и вращающего момента для двигателя ВИД-3,5-1130 в режиме $U = 550$ В, $I_{ref} = 30$ А, $\omega = 118,2$ рад/с, $\theta_{on} = 0$, $\theta_{off} = \pi/5$

Номер эксперимента	P , Вт	U , В	n , мин ⁻¹	M , Н·м	I_{rms} , А	θ_{on} , град.	θ_{off} , град.
I	605,3	265,3	1332	4,84	4,24	-4,2	21,5
Модель 1		265	1332	1,83	3,73		
Модель 2			1520	1,47	8,25		
Модель 3			1332	2,55	3,98		
II	607,6	271	1091	5,0	4,33	-4,2	33,3
Модель 1			1091	2,19	3,43		
Модель 2			1041	178	7,79		
Модель 3			1091	2,62	3,36		
III	623,7	263,5	1002	5,94	4,50	-4,2	25,0
Модель 1			1002	2,45	3,5		
Модель 2			1186	2,00	6,38		
Модель 3			1002	2,77	3,33		

Наибольшее различие дает модель 2, которая определяет угловую частоту вращения, что может быть объяснено тем, что экспериментальные режимы являются режимами небольшой нагрузки, при которой зависимость частоты вращения от момента очень велика. Даже в этом случае погрешность расчета по частоте вращения составляет от 4 до 14%.

Представленные модели пригодны для моделирования любого двигателя с отношением зубцов статора и ротора 6/4 и требуют только внесения соответствующих исходных данных, в том числе и в блоки *Look-Up Table* и *Look-Up Table 1*. Для моделирования трехфазного ВИД с отношением зубцов статора и ротора 12/8 потребуется изменить *m*-файлы в блоках *Matlab Function* и *Matlab Function 7*. При моделировании четырехфазного ВИД с отношением зубцов статора и ротора 8/6 в схемы моделирования добавляется еще одна фаза, и изменяются *m*-файлы в блоках *Matlab Function* и *Matlab Function 7*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lawrenson P.J., Stephenson J.M., Blenkinsop P.T., Corda J., Fulton N.N. Variable-speed switched reluctance motors. – IEEE Proc. B Power Applications, 1980, vol. 127, No. 4, pp. 253–265.
2. Miller T.J.E. Switched Reluctance Motors and their Control. – Magna Physics Publishing and Oxford University Press, London, 1993, 200 p.

3. Krishnan R. Switched Reluctance Motor Drives, book by CRC press, 2001, 432 p.

4. Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. 71 с.

5. Птах Г.К. Вентильно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: Зарубежный и отечественный опыт. – Электротехника: сетевой электронный научный журнал, 2015, т. 2, № 3, с. 23–33.

6. Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В. Разработка базовых вентильно-индукторных электродвигателей тягового привода для городского электротранспорта (метро, трамвай, троллейбус). – Сб. докладов Научно-технической конф. АЭН РФ «Актуальные вопросы и перспективы развития электромашиностроения», Москва, 3 декабря 2015 г. М.: ВНИИКП, с. 102–109.

7. Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В. Исследование характеристик базовых вентильно-индукторных электродвигателей тягового привода городского электротранспорта. – Электричество, 2016, № 10, с. 45–52.

8. Soares F., Costa Blanco P.J. Simulation of a 6/4 Switched Reluctance Motor Based on Matlab/Simulink Environment. – IEEE Transaction on aerospace and electronic systems, 2001, vol. 37, No. 3, pp. 989–1009.

9. Chancharoensook P., Rahman M.F. Dynamic Modelling of a Four-Phase 8/6 Switched Reluctance Motor Using Current and Torque Look-up Tables. – IEEE Proc., Nov. 2002, pp. 491–496.

10. Грозов А.Д., Антипов В.Н. Лабораторный образец вентильно-индукторного двигателя для регулируемого реактивного привода городского транспорта. – Сб. материалов научной конф. «Неорганическая химия – фундаментальная основа в материаловедении керамических, стеклообразных и композиционных материалов». – С.-Петербург, 2016, с. 44–47.

А в т о р ы : **Антипов Виктор Николаевич** окончил Ленинградский политехнический институт (ныне Санкт-Петербургский государственный политехнический университет) в 1963 г. Защитил докторскую диссертацию «Обеспечение заданных коммутационных качеств при проектировании машин постоянного тока промышленного назначения» в 1989 г. Ведущий научный сотрудник Института химии силикатов имени И.В. Гребенщикова РАН (ИХС РАН).

Грозов Андрей Дмитриевич окончил Ленинградский политехнический институт в 1979 г. Научный сотрудник ИХС РАН.

Иванова Анна Владимировна окончила Ленинградский государственный университет в 1979 г. Защитила кандидатскую диссертацию «Колебания модели упругого летательного аппарата в виде системы тонкостенных стержней в турбулентной атмосфере» в 1989 г. Старший научный сотрудник ИХС РАН.

Elektrichestvo, 2018, No. 6, pp. 60–65

DOI:10.24160/0013-5380-2018-6-60-65

Simulation of Switched Reluctance Motors in the MATLAB/Simulink Environment

ANTIPOV Viktor N. (Russian Academy of Sciences (RAS), Institute of Silicate Chemistry (ISCh), St. Petersburg, Russia) – Leading scientist, Dr. Sci. (Eng.)

GROZOV Andrei D. (RAS ISCh, St. Petersburg, Russia) – Scientist

IVANOVA Anna V. (RAS ISCh, St. Petersburg, Russia) – Senior Scientist, Cand. Sci. (Eng.)

Three types of switched reluctance motor (SRM) models are proposed and developed in the MATLAB/Simulink environment for efficiently designing, studying, and controlling SRMs. The proposed models offer the possibility to improve the designing procedure, to rationally select the control parameters (I_{ref} , 0_{on} , 0_{off} , M_{load}), and to obtain the variation dynamics of the key motor parameters in different modes of SRM operation. The possibilities of calculations and studies available in the models are shown taking as an example a VID-3.5-1130 motor with the stator/rotor lobe ratio equal to 6/4. The models also take into account possible saturation of the motor. The currents and torques are calculated using the Look-Up Table modules, and the control algorithms are calculated using the Matlab Function modules. The models offer the possibility to improve the designing procedure, to make a rational choice of control parameters, and to study the dynamics of motor behavior in different modes of its operation. By changing the input data in the Look-Up Table modules and the m-files in the Matlab Function modules, it is possible to simulate SRMs with different stator/rotor lobe ratios.

Key words: switched reluctance electric motor, magnetic core configuration, simulation, designing

REFERENCES

1. Lawrenson P.J., Stephenson J.M., Blenkinsop P.T., Corda J., Fulton N.N. Variable-speed switched reluctance motors. – IEEE Proc. B Power Applications, 1980, vol. 127, No. 4, pp. 253–265.
2. Miller T.J.E. Switched Reluctance Motors and their Control. – Magna Physics Publishing and Oxford University Press, London, 1993, 200 p.
3. Krishnan R. Switched Reluctance Motor Drives, book by CRC press, 2001, 432 p.
4. Kuznetsov V.A., Kuz'michev V.A. *Ventil'no-induktornye dvigateli* (Valve inductor drives). Moscow, Moscow Power Engineering Institute, 2003, 71 p.
5. Ptakh G.K. *Elektrotehnika: setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal* – in Russ. (Electrical Engineering: power electronic scientific journal), 2015, vol. 2, No. 3, pp. 23–33.
6. Antipov V.N., Grozov A.D., Ivanova A.V. *Sb. dokladov Nauchno-tehnicheskoi konf. AEN RF «Aktual'nye voprosy i perspektivy razvitiya elektromashinostroyeniya»* – in Russ. (Proc. of the Scientific-practical conf. of RF Academy of Electrotechnical

Sciences «Timely problems and development perspectives of the electric machine), All Russian Scientific Institute of the Cable Industry, 3 December 2015, pp. 102–109.

7. Antipov V.N., Grozov A.D., Ivanova A.V. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2016, No. 10, pp. 45–52.

8. Soares F., Costa Blanco P.J. Simulation of a 6/4 Switched Reluctance Motor Based on Matlab/Simulink Environment. – IEEE Transaction on aerospace and electronic systems, 2001, vol. 37, No. 3, pp. 989–1009.

9. Chancharoensook P., Rahman M.F. Dynamic Modelling of a Four-Phase 8/6 Switched Reluctance Motor Using Current and Torque Look-up Tables. – IEEE Proc., Nov. 2002, pp. 491–496.

10. Grozov A.D., Antipov V.N. *Sb. materialov nauchnoi konf. «Neorganicheskaya khimiya – fundamental'naya osnova v materialovedenii keramicheskikh, stekloobraznykh i kompozitsionnykh materialov»* (Proc. of the Scientific konf. «Inorganic chemistry is the fundamental basis in the materials science of ceramic, glass and composite materials»). St. Petersburg, 2016, pp. 44–47.

[25.02.2018]