

Имитационная математическая модель синхронной магнитоэлектрической машины в генераторном режиме в среде Matlab Simulink

// Imitative mathematical model of the synchronous magnetoelectric machine created with the help of Matlab Simulink environment in generating mode //

**Волокитина Е.В., к.т.н., Никитин В.В.,
Опалев Ю.Г., Тебеньков Ф.Г.
ОАО «Электропривод», г. Киров**

*В статье рассматриваются проблемы имитационного моделирования генераторного режима синхронной магнитоэлектрической машины на холостом ходу и под нагрузкой в среде Matlab Simulink. Проводится сравнение результатов моделирования с результатами аналитического расчета и натурного эксперимента. **Ключевые слова:** математическая модель, имитационное моделирование, синхронный генератор, постоянный магнит, Matlab Simulink.*

Имитационное моделирование является наиболее удобным и наглядным методом исследования процессов, происходящих в электромеханических системах. В настоящее время разработано математическое описание большинства типов электрических машин [1] и аппаратов, что позволило разработчикам программного обеспечения выпустить специальные пакеты программ для имитационного моделирования, имеющие в своем составе готовые блоки различных электротехнических устройств – LabVIEW, Matlab Simulink, System View, PDS, Visual System Simulator и др.

Для моделирования синхронной магнитоэлектрической машины использовалась система Matlab Simulink, имеющая в своем составе специализированную электротехническую библиотеку блоков. Процесс моделирования в Matlab Simulink представляет

*In the article the problems of simulation modeling of the synchronous magnetoelectric machine in generating mode at idling and under loading in the Matlab Simulink environment are considered. Comparison of modeling results with analytical calculation results and full-scale experiment is carried out. **Keywords:** mathematical model, simulation modeling, synchronous generator, permanent magnet, Matlab Simulink.*

собой построение схемы устройства из стандартных блоков пакета и задание параметров ее отдельных элементов [2,3].

Внешняя простота и наглядность моделирования в Simulink имеет ряд особенностей. Из-за специфики математических алгоритмов зачастую приходится решать проблемы совместимости блоков, использовать различные приемы и ухищрения. На сегодняшний день существует большое количество публикаций, посвященных вопросам имитационного моделирования в среде Matlab Simulink, например, [2-5 и др.].

К сожалению, модели, приведенные в открытых источниках, не всегда подходят для решения узкоспециализированных задач, а самостоятельная доработка под конкретное применение требует определенных знаний специфики построения функционирования блоков.

Цель настоящей статьи – на примере разработки математической модели синхронного магнитоэлектрического генератора показать некоторые вопросы практического использования блоков электротехнической библиотеки Sim Power Systems пакета Matlab Simulink, а также сопоставить результаты моделирования с данными аналитического расчета и результатами натурного эксперимента.

Объектом моделирования является синхронная неявнополюсная магнитоэлектрическая машина, приводимая во вращение от внешнего привода с заданной частотой и работающая на симметричную активную нагрузку.

При разработке имитационной математической модели использовался Simulink версии 6.2, выпущенный фирмой MathWorks в 2005 году. В настоящее время существуют более поздние версии Simulink, в которых добавлены новые функции и блоки, а также устранены многие недостатки, присутствующие в ранних версиях. Высокая стоимость лицензионного пакета Matlab Simulink ограничивает возможность его регулярного обновления, поэтому перед инженерами достаточно часто встает задача разработки имитационных математических моделей в ранних версиях Simulink. В этом случае ряд задач, которые достаточно просто решаются в новых версиях Simulink, имеют непростое решение в ранних версиях. В связи с этим авторы рассматривают особенности построения имитационной математической модели магнитоэлектрической машины в генераторном режиме при использовании

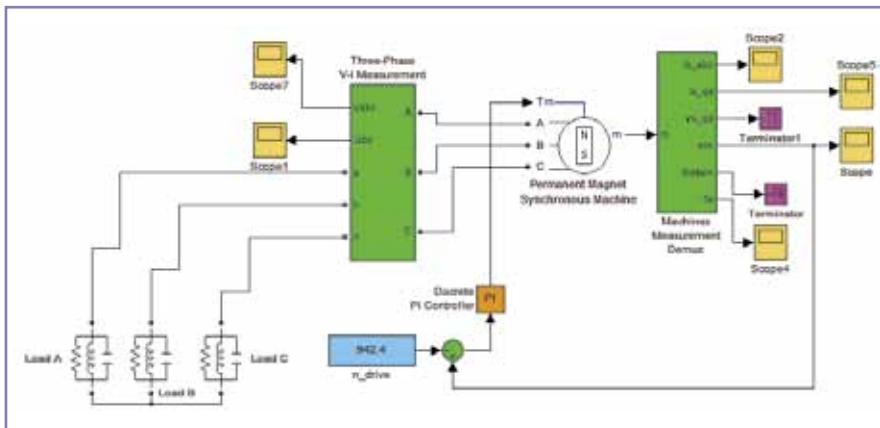


Рис. 1. Структурная схема модели синхронного магнитоэлектрического генератора в Matlab Simulink.

пакета Matlab Simulink версии 6.2.

Структурная схема модели синхронного магнитоэлектрического генератора, реализованная в Matlab Simulink, показана на рис. 1.

Основным элементом модели является блок Permanent Magnet Synchronous Machine из электротехнической библиотеки Sim Power Systems.

Блок Permanent Magnet Synchronous Machine содержит в себе систему уравнений синхронной магнитоэлектрической машины в двухфазной, вращающейся синхронно с ротором системе координат dq [6]

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}i_d = \frac{1}{L_d}u_d - \frac{R}{L_d}i_d + \frac{L_q}{L_d}p \cdot \omega \cdot i_q \\ \frac{d}{dt}i_q = \frac{1}{L_q}u_q - \frac{R}{L_q}i_q - \\ - \frac{L_d}{L_q}p \cdot \omega \cdot i_d - \frac{\psi \cdot p \cdot \omega}{L_q} \\ M_e = 1,5 \cdot p \cdot (\psi \cdot i_q + (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q) \\ \frac{d}{dt}\omega = \frac{1}{J}(M_m - F \cdot \omega - M_e) \end{cases} \quad (1)$$

где i_d, i_q – проекции тока статора на осях d и q , соответственно, А;

u_d, u_q – проекции напряжения подводимого к статору на осях d и q , соответственно, В;

L_d, L_q – индуктивности синхронной машины по продольной и поперечной оси, Гн;

R – активное сопротивление фазы статора, Ом;

p – число пар полюсов;

ω – частота вращения ротора, рад/с;

ψ – потокосцепление фазы статора, Вб,

M_m – механический момент привода, Н·м;

F – коэффициент, учитывающий трение в подшипниках электрической машины, Н·м·с;

J – момент инерции электрической машины;

M_e – электромагнитный момент электрической машины, Н·м.

Переход от двухфазной системы координат dq к трехфазной естествен-

ной системе координат осуществляется в соответствии с уравнениями [6]

$$\begin{cases} u_A = u_d \sin(\omega t) + u_q \cos(\omega t) \\ u_B = u_d \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \\ + u_q \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ u_C = u_d \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + \\ + u_q \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (2)$$

где u_A, u_B, u_C – мгновенные значения фазных напряжений.

В таблице 1 приведено пояснение параметров блока Permanent Magnet Synchronous Machine.

При реализации генераторного режима блока Permanent Magnet Synchronous Machine возникает проблема задания частоты вращения привода генератора, т.к. изначально в блоке предполагается задание вращающего момента.

В модели эта проблема решена следующим образом. Задание частоты вращения привода генератора осуществляется блоком константы n_drive. Это значение сравнивается с текущим значением частоты вращения на выходе блока Permanent Magnet Synchronous Machine. Полученный сигнал ошибки с сумматора подается на ПИ-регулятор Discrete PI Controller, выход которого подключен ко входу Tm блока Permanent Magnet Synchronous Machine.

Более поздние версии Simulink позволяют задавать частоту вращения

Таблица 1. Параметры блока Permanent Magnet Synchronous Machine.

Параметр	Величина, единица измерения	Примечание
Resistance R(ohm)	Электрическое сопротивление фазы R, Ом	–
Inductances Ld(H) Lq(H)	Индуктивности Ld и Lq, Гн	–
Flux induced by magnets (Wb)	Потокосцепление фазы ψ , Вб	$\psi = \Phi_0 \cdot W \cdot k_{об}$, где Φ_0 – магнитный поток в воздушном зазоре, Вб; W – число витков фазы статора; $k_{об}$ – обмоточный коэффициент
Inertia J(kg.m ²)	Момент инерции ротора электрической машины J, кг·м ²	–
Friction factor F(N.m.s)	Коэффициент учитывающий трение F, Н·м·с	–
p	Число пар полюсов электрической машины	–



Рис. 2. Бесконтактный магнитоэлектрический электродвигатель ДБ100-4000-12.

генератора, подавая сигнал задания непосредственно на вход блока Permanent Magnet Synchronous Machine. Более подробное описание возможностей данного блока, а также наглядные примеры его применения в моделях вентильных электродвигателей приведены в [7].

В качестве нагрузки генератора (Load A, Load B, Load C) используются стандартные блоки Parallel RLC Branch библиотеки Sim Power Systems.

В модели также присутствуют вспомогательные измерительные блоки Three-Phase V-I Measurement и Machines Measurement Demux, а также блоки визуализации результатов Scope.

Для оценки адекватности модели было проведено моделирование генераторного режима бесконтактного магнитоэлектрического электродвигателя ДБ100-4000-12 (рис. 2) разработ-

Таблица 2. Значения линейной ЭДС.

Частота вращения n , об/мин	ЭДС Ел, В		Расхождение, %
	модель	расчет	
3000	49	49,5	1,09
3600	59	59,5	0,76
5000	82	82,6	0,69
9000	147	148,6	1,09
12000	197	198,2	0,59

ки ОАО «Электропривод» на холостом ходу и под нагрузкой и сравнение результатов с аналитическим расчетом и экспериментальной проверкой.

Проведение натурного эксперимента заключалось в определении ЭДС холостого хода и внешних характеристик ДБ100-4000-12, работающего в генераторном режиме.

При моделировании генераторного режима на холостом ходу проводилось определение действующего значения линейной ЭДС и сопоставление полученных значений с результатами аналитического расчета.

Формула для аналитического расчета действующего значения линейной ЭДС синхронной магнитоэлектрической машины имеет вид

$$E_{л} = 4\sqrt{3} \cdot k_{\phi} \cdot k_{об} \cdot \frac{p \cdot n}{60} \cdot \Phi_0 \cdot W \quad (3)$$

где $k_{об}$ – коэффициент формы поля; n – частота вращения ротора, об/мин.

Препятствием к моделированию работы блока Permanent Magnet Synchronous Machine в генераторном режиме на холостом ходу является

обстоятельство невозможности функционирования блока при отсутствии подключения к его выводам блока нагрузки.

Таким образом, для моделирования холостого хода генератора к выводам Permanent Magnet Synchronous Machine необходимо подключить блоки активной нагрузки, значение сопротивления которых должно быть не менее величины сопротивления изоляции (обычно оно составляет несколько МОм).

В таблице 2 приведено сравнение значений линейной ЭДС на различных частотах вращения генератора, полученных при моделировании в Simulink и аналитическим расчетом по формуле (3).

Как видно из таблицы 2, расхождение результатов моделирования и результатов аналитического расчета незначительно, что позволяет утверждать о правильности задания параметров моделирования.

На рис. 3 показаны осциллограммы линейных ЭДС при частоте вращения 9000 об/мин, полученные в результате моделирования.

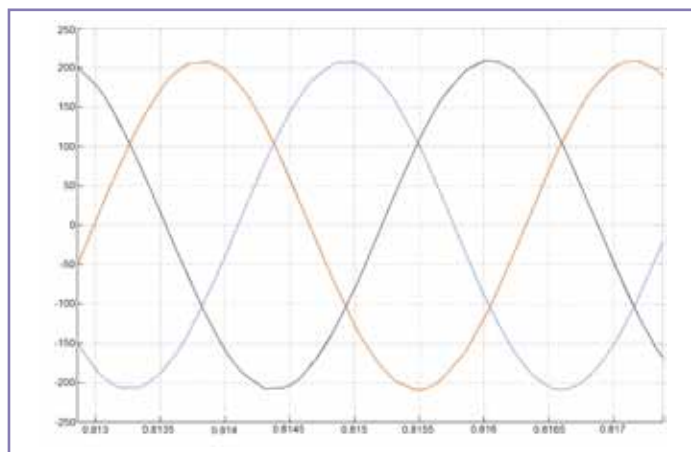


Рис. 3. Осциллограммы линейных ЭДС при частоте вращения генератора 9000 об/мин, полученные в результате моделирования.

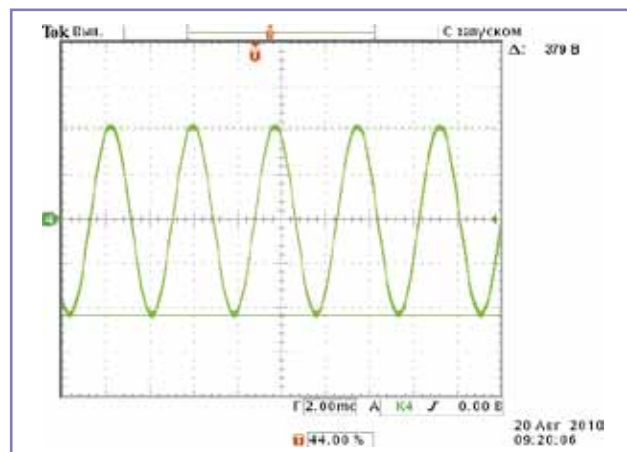


Рис. 4. Осциллограмма линейной ЭДС при 9000 об/мин, полученная в результате натурного эксперимента.

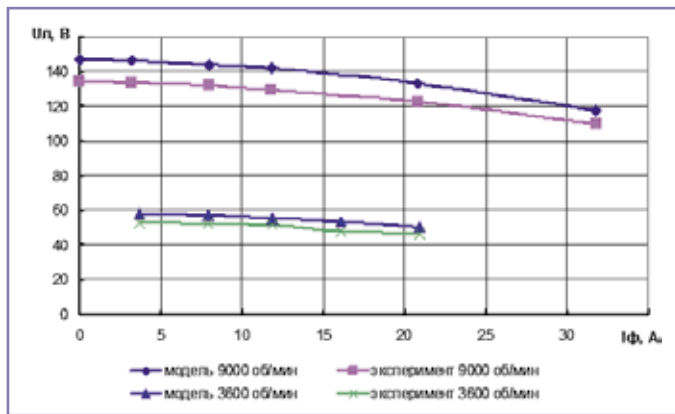


Рис. 5. Внешние характеристики генератора.

На рис. 4 показана осциллограмма линейной ЭДС генератора при частоте вращения 9000 об/мин, полученная в результате натурного эксперимента.

Действующее значение ЭДС по рис. 4 составляет 134 В. Расхождение результатов экспериментальной проверки и моделирования составляет 9,7 %, что можно считать допустимым. Более низкое значение ЭДС в экспериментальных данных может быть объяснено меньшим, по сравнению с расчетным, магнитным потоком ротора.

Для оценки адекватности моделирования в режиме работы под нагрузкой на модели были определены внешние характеристики генератора на частотах вращения 3600 и 9000 об/мин и проведено их сравнение с экспериментальными данными (рис. 5).

Из анализа рис. 5 видно, что внешние характеристики, полученные в результате моделирования, близки к

внешним характеристикам экспериментального исследования. Расхождение результатов моделирования и эксперимента составило, в среднем, 9 %, что является удовлетворительным.

Осциллограммы линейных напряжений генератора при частоте вращения 9000 об/мин и токе 8 А, полученные в результате моделирования и эксперимента, показаны, соответственно, на рис. 6 и 7.

Выводы

В ходе проведенной работы были получены следующие результаты:

1. Разработана имитационная математическая модель синхронной магнитоэлектрической машины, работающей в генераторном режиме в пакете Matlab Simulink версии 6.2.

2. Решены проблемы:

– моделирования генератора, работающего с заданной частотой вращения;

– моделирования холостого хода генератора.

3. Проведено моделирование генераторного режима синхронной магнитоэлектрической машины на холостом ходу и под нагрузкой. Получена приемлемая сходимость результатов моделирования с результатами аналитического расчета и экспериментального исследования.

Литература:

1. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – ГУП «Издательство «Высшая школа», 2001. – 327 с.
2. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0. – СПб, КОРОНА принт, 2001. – 320 с.
3. Дьяконов В. Специальный справочник Simulink 4. – СПб, ПИТЕР, 2002. – 528 с.
4. Герман-Галкин С.Г., Кардонов Г.А. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК. – СПб, КОРОНА принт, 2003 – 256 с.
5. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в Matlab. Учебный курс. – СПб: Питер, 2005 – 512 с.
6. Власов А.И. Магнитоэлектрический стартер-генератор в системе электроснабжения самолетов нового поколения: Дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Чебоксары: ЧГУ, 2010. – 263 с.
7. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: Корона-Век, 2008. – 368 с.

Волокитина Елена Владимировна – в 1981 году окончила Кировский политехнический институт по специальности «Электромеханика». В 2006 году защитила кандидатскую диссертацию

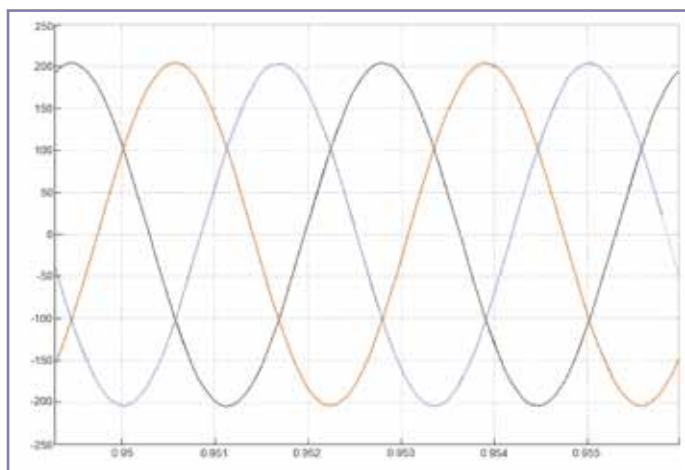


Рис. 6. Осциллограммы линейных напряжений при частоте вращения 9000 об/мин и токе нагрузки 8 А, полученные в результате моделирования.

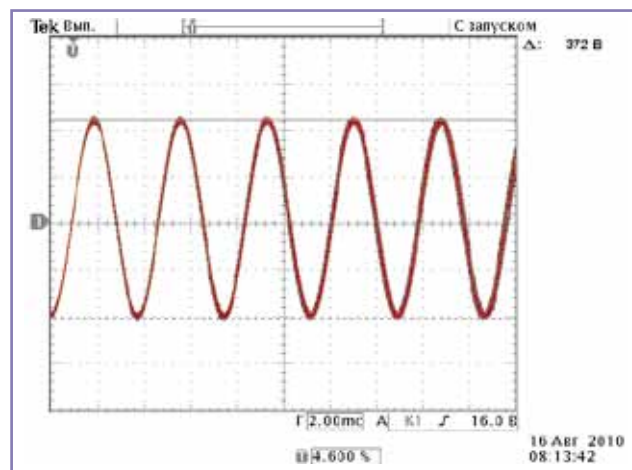


Рис. 7. Осциллограмма линейного напряжения при частоте вращения 9000 об/мин и токе нагрузки 8 А, полученная в результате натурного эксперимента.

на тему: «Исследование и разработка быстродействующего вентильного электропривода органов управления новых самолетов». Доцент кафедры «Электрические машины и аппараты» Вятского государственного университета. Опыт работы в области вентильных электродвигателей – 25 лет, авиационного электропривода – 15 лет. В настоящее время работает ведущим конструктором, руководителем проекта ОАО «Электропривод». Автор 57 научных трудов. Награждена Дипломом лауреата Всероссийского конкурса «Инженер года-2011» по версии «Профессиональные инженеры».

Никитин Владимир Владимирович – родился в 1980 году. В 2002 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электромеханика». 8 лет работает в области авиационного электропривода. В настоящее время – инженер-конструктор I категории ОАО «Электропривод». Аспирант Чувашского государственного университета. Автор 15 научных трудов.

Опалев Юрий Геннадьевич – родился в 1980 году. В 2003 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электромеханика». Имеет 7-летний опыт работы в области авиационных электри-

ческих машин. В настоящее время работает инженером-конструктором I категории ОАО «Электропривод», учится в аспирантуре Чувашского государственного университета. Автор 11 научных трудов.

Тебеньков Фёдор Геннадьевич – родился в 1986 году. В 2008 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электромеханика». Имеет 3-летний опыт работы в области авиационных электрических машин. В настоящее время работает инженером-конструктором 2 категории ОАО «Электропривод».

Volokinina Elena – in 1981 she graduated from Kirov Polytechnic Institute, specialization is «Electromechanics». In 2006 she defended a candidate thesis, the theme is: «Research and development of quick-operating valve electric drive of new plains controllers». She is an associate professor of «Electric machines and equipment» department in Vyatskiy State University. Her job experience in the sphere of valve electric drivers is 25 years, aviation electric drivers– 15 years. At present she is working as a leading designer, project manager in JSC «Electroprivod». She is the author of 57 scientific works. She is awarded to the laureate diploma of All-Russian competition

«Engineer of the year 2011» according to the version «Professional Engineers».

Nikitin Vladimir – was born in 1980. In 2002 he graduated from Vyatskiy State University (VyatGU), specialization is « Electromechanics ». He is working in the sphere of aviation electric drive for 8 years. At present he is working as a design engineer of the first category in JSC «Electroprivod». He is a graduate student of the Chuvash State University. He is the author of 15 scientific works.

Opalev Yury – was born in 1980. In 2003 he graduated from Vyatskiy State University (VyatGU), specialization is «Electromechanics». He has 7-year job experience in the sphere of aviation electric machines. At present he is working as a design engineer of the first category in JSC «Electroprivod», attends graduate courses in Chuvash State University. He is the author of 11 scientific works.

Tebekov Fedor – was born in 1986. In 2008 he graduated from Vyatskiy State University (VyatGU), specialization is « Electromechanics ». Job experience in the sphere of aviation electric machines is 3 years. At present he is working as a design engineer of the second category in JSC «Electroprivod».