

УДК 62-51

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ШАГОВОГО  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ ГИБРИДНОГО ТИПА  
В ПАКЕТЕ SIMULINK**

А.О. Степочкин

*Рассматривается математическая модель шагового электрического двигателя гибридного типа. Представлена реализация модели в пакете Simulink на основе анализа конструктивных параметров и паспортных данных машины. Показан вариант формирования входного сигнала Simulink модели. Выполнен сравнительный анализ результатов моделирования с экспериментальными данными.*

*Ключевые слова: математическая модель гибридного шагового двигателя, модель шагового двигателя в пакете Simulink, расчет параметров модели гибридного шагового двигателя.*

Шаговые электрические двигатели на сегодняшний день являются одним из наиболее перспективных типов электрических машин в системах электропривода бытового, промышленного и военного назначения. Исходя из особенностей конструктивного исполнения, их можно разделить на 3 группы: с переменным магнитным сопротивлением, с постоянными магнитами, гибридного типа. Последние сочетают в себе все основные достоинства шаговых двигателей и чаще всего применяются в качестве исполнительных при реализации соответствующих систем.

В инженерной практике при разработке систем и комплексов важнейшую роль играют прикладные программные пакеты для математического моделирования: MATLAB с пакетом расширения Simulink, Mathcad, Scilab, Octave и др. Их использование для решения задач анализа и синтеза дискретного электропривода в частности на основе шагового двигателя гибридного типа подразумевает наличие простой и обладающей при этом достаточной степенью точности математической модели данной электрической машины. Различные аспекты её формирования рассмотрены в целом ряде работ [1 - 6]. Выполнив обзорный анализ данных источников, можно определить базовую математическую модель на основе уравнений Лагранжа-Максвелла, описывающих основные моменты процесса элек-

тромеханического преобразования энергии. Согласно [6] для 2-х фазного гибридного шагового двигателя соответствующая система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} U_A = i_A R_A + L \frac{di_A}{dt} + \omega p \Psi \sin(p\theta) \\ U_B = i_B R_B + L \frac{di_B}{dt} - \omega p \Psi \cos(p\theta) \\ M_E = p \Psi (i_B \cos(p\theta) - i_A \sin(p\theta)) - M_{cm \max} \sin(2p\theta) \\ J_{\partial \theta} \frac{d\omega}{dt} = M_{\Sigma} - M_C - M_{cm} \\ \omega = \frac{d\theta}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

Модель включает в себя:

- уравнения напряжений каждой из фаз, полученные согласно схеме замещения обмоток;
- выражение для электромагнитного момента, полученное из уравнения баланса мощностей каждой обмотки;
- уравнение движения ротора двигателя под действием электромагнитного вращающего момента и момента статического сопротивления.

Здесь  $U$ ,  $i$ ,  $R$ ,  $\Psi$  – напряжение, ток, сопротивление и амплитудное значение потокосцепления фазы;  $\theta$ ,  $\omega$ ,  $J_{\partial \theta}$ ,  $p$  – угол поворота, угловая частота вращения ротора, момент инерции ротора, число пар полюсов ротора;  $M_{\Sigma}$  – суммарный электромагнитный момент;  $M_{cm \max}$  – амплитудное значение статического фиксирующего момента, определяемого постоянными магнитами ротора;  $M_C$  – момент статического сопротивления вала двигателя.

В данном случае справедлива следующая система допущений:

- магнитная цепь электрической машины линейна, насыщение магнитопровода не учитывается, падение магнитного напряжения отсутствует;
- сердечники считаются гладкими, рабочий зазор – равномерным;
- учитываются только основные гармоники тока, магнитодвижущей силы (МДС), потока и ЭДС,
- взаимной индуктивностью обмоток пренебрегаем.
- влияние вихревых токов в магнитопроводе не учитывается.

Численный расчет модели подразумевает знание величин соответствующих её коэффициентов, корректное определение которых является самостоятельной задачей и требует отдельного рассмотрения.

В ходе работы с данной моделью был сформулирован и апробирован следующий подход к данному расчету.

В первую очередь соответствующие коэффициенты необходимо разделить на 3 группы:

- заданные в паспортных данных;
- рассчитанные в соответствии с известными конструктивным параметрами;
- определенные в результате эксперимента.

В качестве примера рассмотрим 2-х фазный шаговый двигатель гибридного типа с располагаемыми паспортными данными, сборочными чертежами, схемой подключения обмоток и схемой подачи напряжения питания.

Коэффициенты модели из паспортных данных:

- напряжение питания фаз  $U_A$  и  $U_B$ ;
- номинальное значение тока статора  $i_A$  и  $i_B$ ;
- сопротивление обмотки статора  $R_A$  и  $R_B$ ;
- индуктивность обмоток  $L$ ;
- амплитудное значение статического фиксирующего момента

$M_{ст\ max}$

Коэффициенты модели, полученные путем анализа конструкторской документации:

- число пар полюсов ротора  $p$ ;
- момент инерции ротора  $J_{\partial\theta}$ .

Число пар полюсов, очевидно, может быть получено путем непосредственного анализа конструкторской документации.

Момент инерции ротора может быть рассчитан по известным зависимостям путем анализа сборочных чертежей, а также с помощью заданной, либо предварительно разработанной 3D-модели двигателя в пакете SolidWorks или аналогичном.

Коэффициентом модели, определяемым экспериментально, является амплитудное значение потокосцепления фазы двигателя.

Методика эксперимента состоит в следующем:

- ротор принудительно и при отсутствии напряжения питания раскручивается до скорости  $\omega = const$ ;
- выполняется измерения напряжения одной из фаз (величины противоЭДС вращения  $E$ );

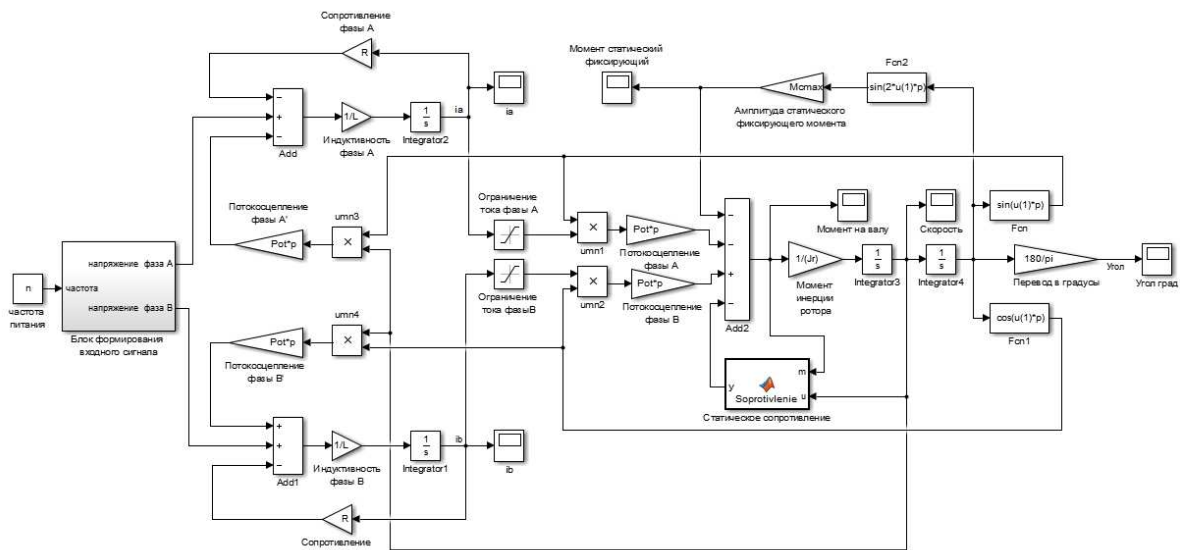
Исходя из полученных результатов измерения и уравнений для напряжений фаз двигателя, амплитудное значение потокосцепления фазы ротора можем рассчитать по зависимости (2):

$$\Psi \approx \frac{E}{\omega p} \quad (2)$$

В случае отсутствия возможности проведения экспериментальных исследований, величина амплитудного значения потокосцепления в первом приближении может быть оценена по зависимости (3):

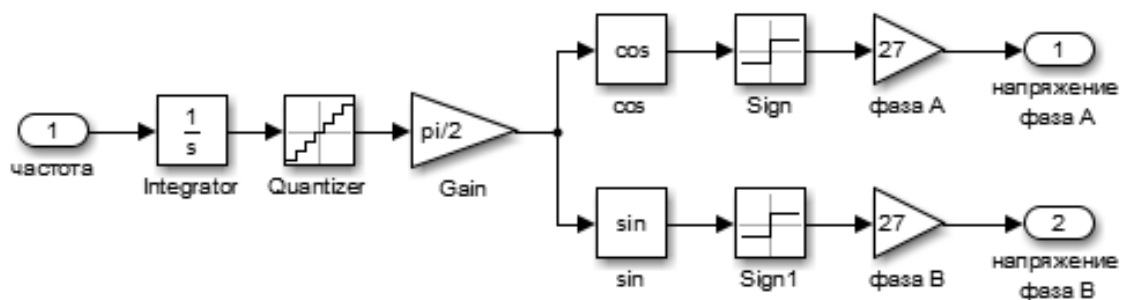
$$\Psi \approx Li \quad (3)$$

Реализация модели в пакете Simulink представлена на рис. 1.



**Рис. 1. Simulink-модель 2-х фазного гибридного шагового двигателя**

Входной сигнал модели формируется в подсистеме «блок формирования входного сигнала» (рис. 2). В данном случае моделируется так называемый режим полного шага (full step mode) [5].

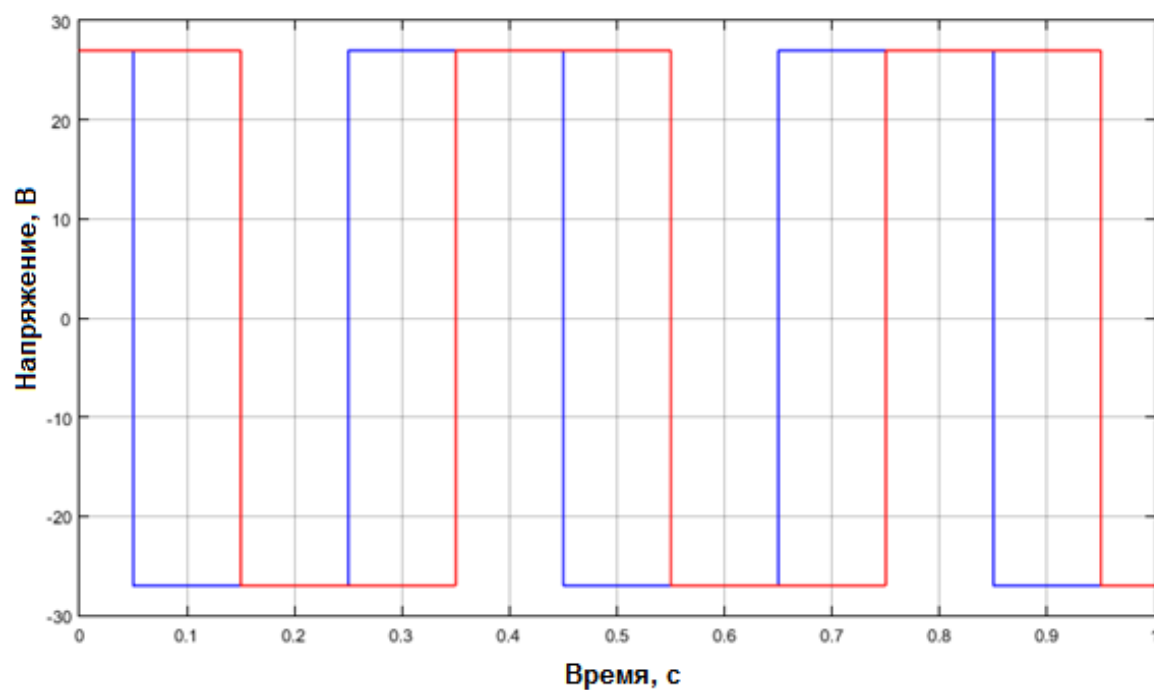


**Рис. 2. Подсистема формирования входного сигнала напряжения Simulink-модели 2-х фазного гибридного шагового двигателя**

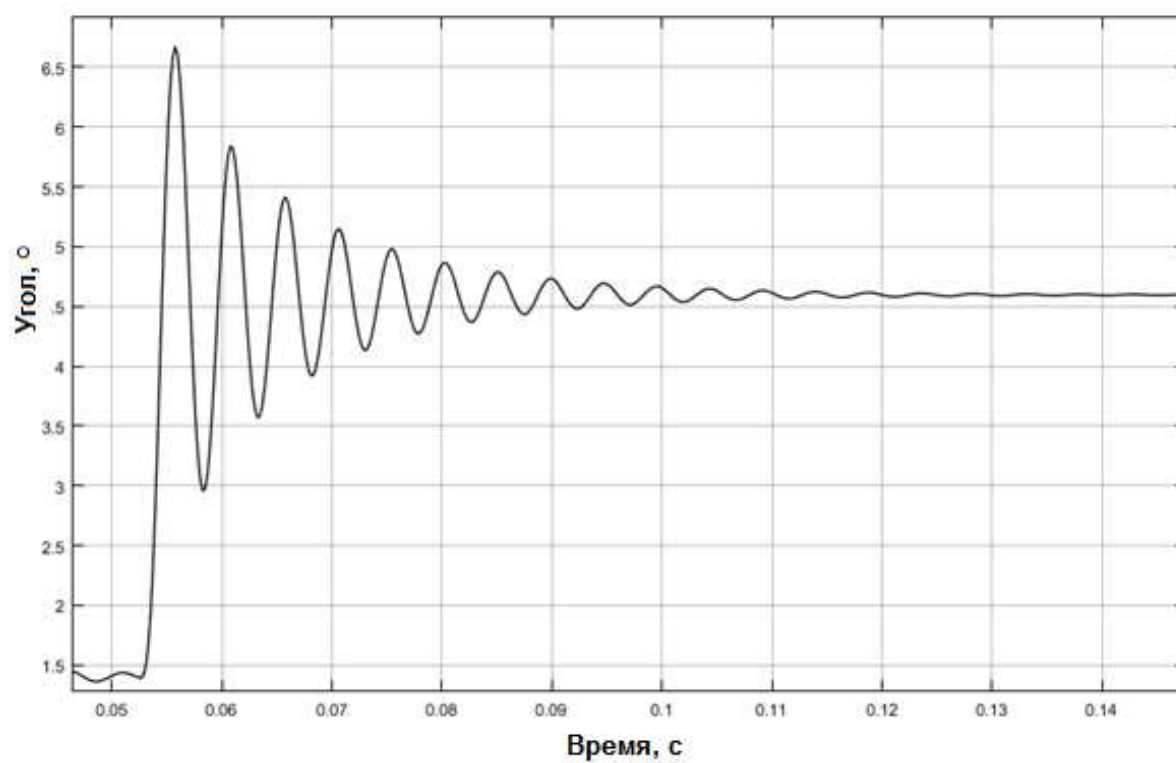
Полученные с помощью данной подсистемы входные сигналы фаз модели при заданной частоте питания 10 Гц представлены на рис. 3.

Переходный процесс модели по углу поворота при частоте входного сигнала 10 Гц представлен на рис. 4.

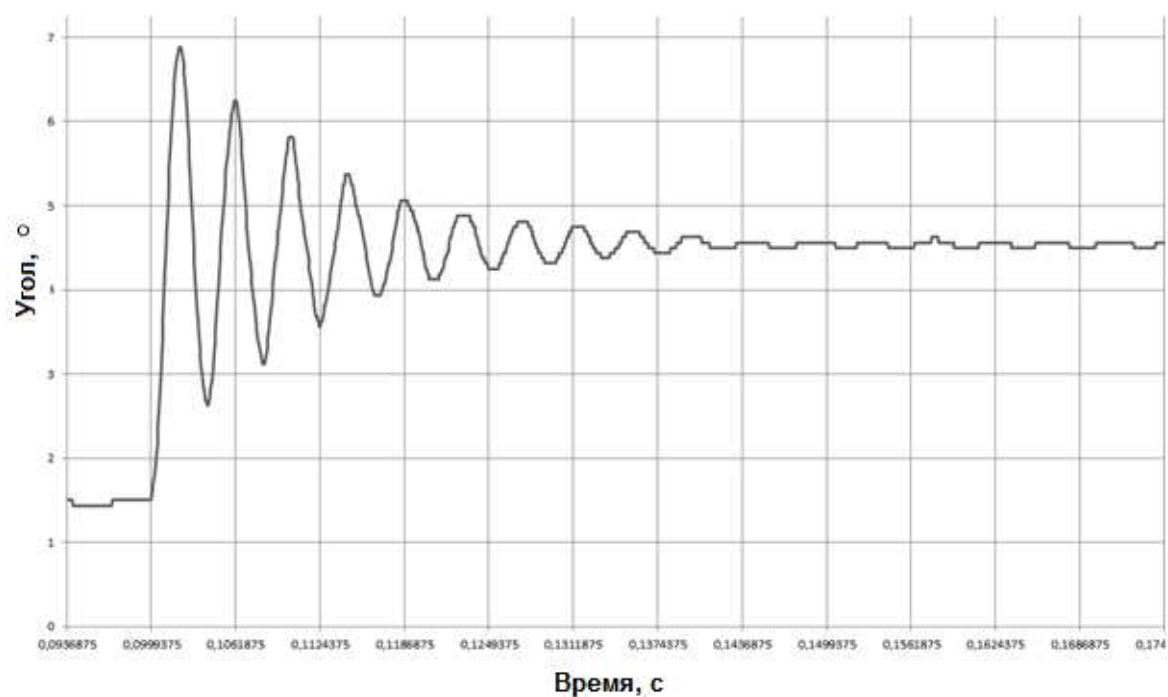
Результаты эксперимента по снятию переходного процесса по углу поворота двигателя на рис. 5.



**Рис. 3. Входные сигналы напряжения фаз Simulink-модели**

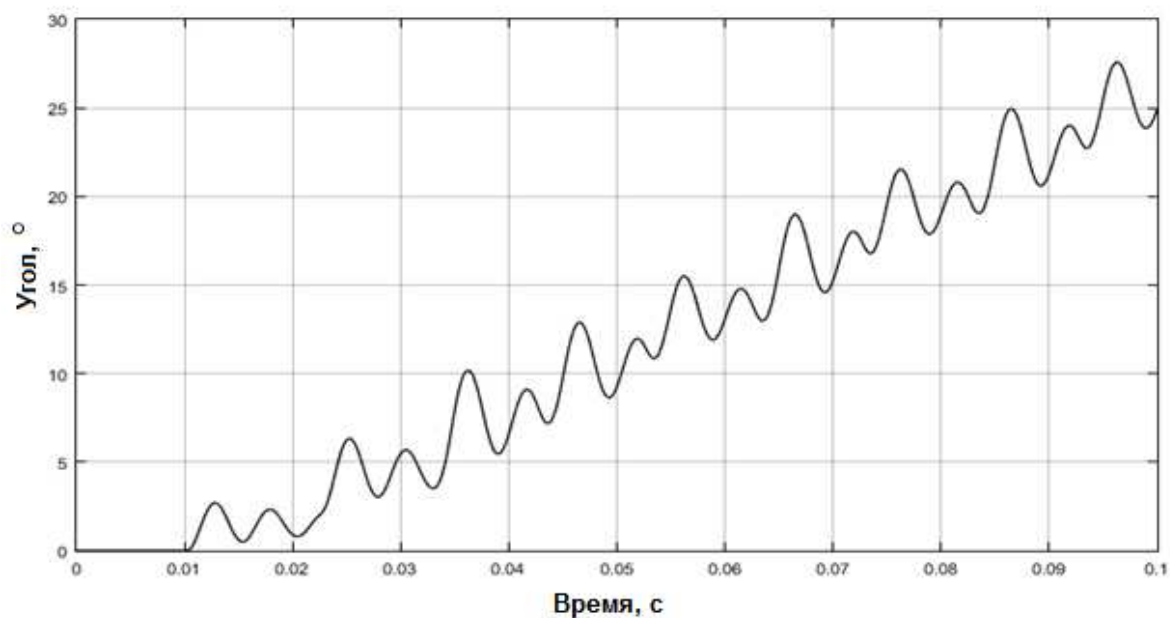


**Рис. 4. Переходный процесс Simulink-модели по углу поворота ротора при частоте входного сигнала 10 Гц**

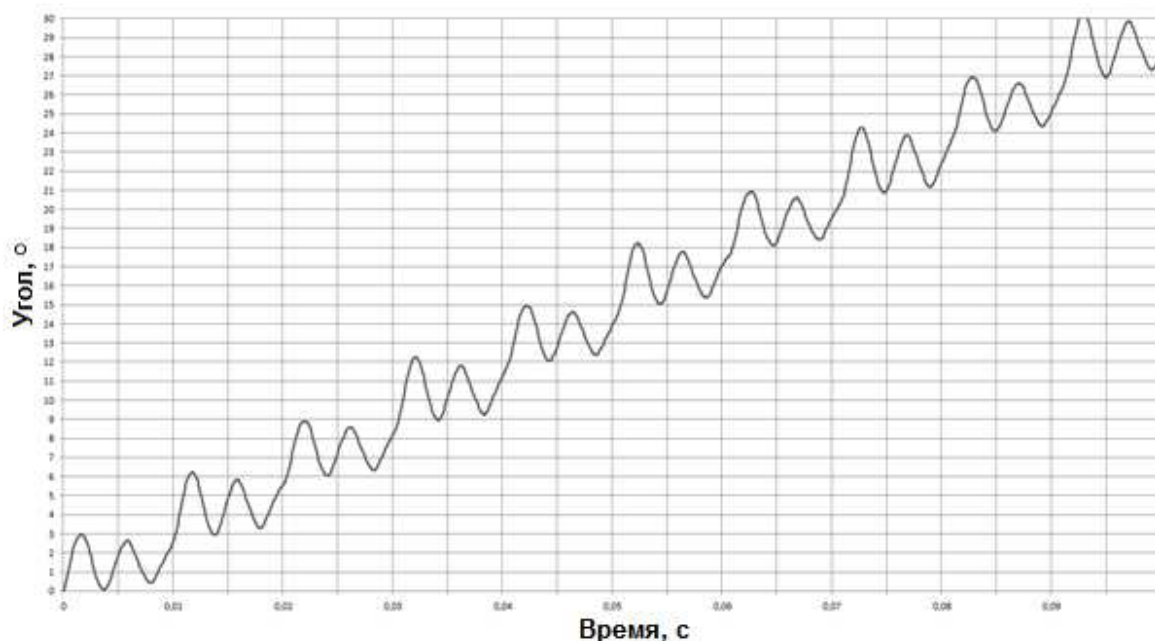


**Рис. 5. Экспериментальный переходный процесс по углу поворота при частоте входного сигнала 10 Гц**

При частоте питания 100 Гц.



**Рис. 6. Результаты моделирования угла поворота вала для модели без инерционной нагрузки при частоте питания 100 Гц**



**Рис. 7. Экспериментальный переходный процесс по углу поворота вала двигателя без инерционной нагрузки при частоте питания 100 Гц**

Выполняя сравнительный анализ рис. 4 - 7, можно сделать вывод о качественной и количественной сходимости результатов моделирования и экспериментальных данных. Величина отклонений параметров, рассчитанных численно и полученных в ходе эксперимента, не превышает 5%.

Соответственно, рассмотренная математическая модель гибридного шагового двигателя (1) в сочетании с предложенной методикой подбора и расчета её коэффициентов может быть использована как для анализа статических и динамических характеристик данной электрической машины, так и для решения широкого круга задач анализа и синтеза систем дискретного электропривода на её основе.

### Список литературы

1. Емельянов А.В., Шилин А.Н. Шаговые двигатели: учебное пособие. ВолгГТУ. Волгоград, 2005. 48 с.
2. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления; пер. с англ. М.: Энергоатомиздат. 198. 200 с.
3. Чиликин М.Г. Дискретный электропривод с шаговым двигателем. М.: Энергия, 1971. 624 с.
4. Штёлтинг Г. Байссе А. Электрические микромашины; пер. с немецкого. М.: Энергоатомиздат, 1991. 229 с.

5. Stepping Motors: A Guide to Theory and Practice. The Institution of Electrical Engineers. London. 2003.

6. Chirila A., Deaconu I., Navrapescu V., Albu M., Ghita C. On the model of a Hybrid Stepper Motor. In: Proc IEEE international conference on industrial electronics; 2008. P. 496-501.

*Степочкин Александр Олегович, аспирант, [s.a.o.1984@yandex.ru](mailto:s.a.o.1984@yandex.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет*

#### MODELING OF A HYBRID STEPPER MOTOR IN SIMULINK

*A.O. Stepochkin*

*A mathematical model of a hybrid stepper motor is considered. The implementation this mathematical model is presented in Simulink on the basis of analysis of design parameters and passport data of the machine. The variant of the input signal generation in Simulink model is shown. A comparative analysis of the simulation results with experimental data is performed.*

*Key words: mathematical model of a hybrid stepper motor, Simulink model of a hybrid stepper motor, calculation of the parameters of a hybrid stepper motor model.*

*Stepochkin Alexander Olegovich, postgraduate, [s.a.o.1984@yandex.ru](mailto:s.a.o.1984@yandex.ru) Russia, Tula, Tula State University*