

# Верификация математической модели бесконтактного двигателя постоянного тока в Simulink с использованием паспортных и экспериментальных данных

Ф.Ш. Аль Махтури

Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
m-ph-2011@hotmail.com,

Д. В. Самохвалов

Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
dmitry.samokhvalov@gmail.com

**Аннотация.** В данной статье предложен метод верификации математической модели бесконтактного двигателя постоянного тока с использованием программы Simulink. Рассмотрено использование динамических (характеристик переходного процесса по току) и статических характеристик (регулируемых характеристик), полученных при математическом моделировании. По переходным процессам модели предлагается определять электромеханическую и электромагнитную постоянные времени и сравнивать их с паспортными данными двигателя. Показано, как анализ пульсаций скорости двигателя (подсчёт значения частоты пульсаций при заданной скорости) позволяет проверить правильность работы модели.

**Ключевые слова:** БДПТ; верификация математической модели; Simulink; динамические и статические характеристики

## I. ВВЕДЕНИЕ

Программа Simulink, как интерактивный инструмент для моделирования и анализа динамических систем, позволяет строить графические схемы, имитировать работу динамических систем, исследовать работоспособность систем и усовершенствовать математические модели объектов различной природы.

В связи с тем, что библиотечные модели электрических машин Simulink не учитывают все процессы энергетических потерь, а также предусматривая неточности математических описаний [1], закладываемых в схемы Simulink-моделей, необходимо проверять правильность работы виртуальных схем и математических моделей, которые они представляют. В [2] для экспериментальной верификации модели БДПТ, построенной в Simulink, выполняется кодировка системы управления с широтно-импульсной модуляцией на языке VHDL. Затем код загружается в ПЛИС (программируемую логическую интегральную схему) и работа контроллера проверяется экспериментально. В [3] для верификации

разработанной математической модели проводится сравнение результатов идентификации экспериментальной установки, полученных с использованием Identification Toolbox в MatLab, с результатами моделирования в Simulink. Identification Toolbox требует экспериментальные данные о входных и выходных сигналах (сигналы управления и реакция системы). На основе этих данных строится передаточная функция модели. Данный метод верификации математической модели требует наличия стенда, что несомненно усложняет процесс верификации.

Предложенный, в данной статье метод верификации математической модели является более практичным, так как, для верификации нужны только параметры реального объекта, представленные производителем в паспортных данных.

## II. ВЕРИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для проверки правильности работы схемы необходимо, прежде всего, установить адекватность моделирования (правильность расчетов) электрического привода при использовании библиотечной модели синхронной машины с постоянными магнитами. То есть, на начальном этапе целесообразно использовать готовое математическое описание, заложенное в библиотеке электрических машин.

Однако предлагаемый метод верификации позволяет также проверять адекватность математического описания синхронной машины разрабатываемого пользователем.

При этом проверка математического описания синхронной машины и его реализации в Simulink выполняется с помощью сравнения результатов моделирования с результатами моделирования, полученными на начальном этапе при использовании библиотечной модели синхронной машины.

Для верификации модели удобно использовать динамические характеристики и сравнивать их характерные точки с паспортными данными. В данном

случае наблюдаем за переходным процессом по скорости. Установившееся значение скорости сравниваем с паспортным (в номинальном режиме), как показано на рис. 1.

В качестве примера рассмотрен БДПТ НРМ48-5000, параметры которого приведены в таблице 1:

ТАБЛИЦА 1 ПАРАМЕТРЫ БДПТ НРМ48-5000

Параметр	Значение	Единицы измерения
Напряжение источника питания U	48	В
Активное сопротивление обмотки фазы статора R	6.2e-3	Ом
Индуктивность фазной обмотки статора, L	68e-6	мГн
Постоянная ЭДС, C <sub>e(шнк)</sub>	7.73	В <sub>шнк</sub> /(коб/мин)
Постоянная момента, C <sub>t(шнк)</sub>	0.0742	Н.м/А <sub>шнк</sub>
Потокоцепления Ψ <sub>m</sub>	0.0093	В.с
Число пар полюсов P	4	-

Зная темп нарастания скорости, мы можем поверить электромеханическую постоянную времени, при допущении, что мгновенное значение скорости изменяется по аperiodическому закону первого порядка

$$n(t) = n_{ss} - n_{ss} e^{-t/\tau_m}, \quad (1)$$

где  $n(t)$  – мгновенное значение скорости вращения ротора,  $n_{ss}$  – установившееся значение скорости вращения,  $\tau_m$  – механическая постоянная времени.

При  $t = \tau$ , уравнение (1) сводится к следующему виду:

$$n(\tau) = n_{ss} - n_{ss} / e = (1 - 1/e) \cdot n_{ss} = 0.63 \cdot n_{ss}. \quad (2)$$

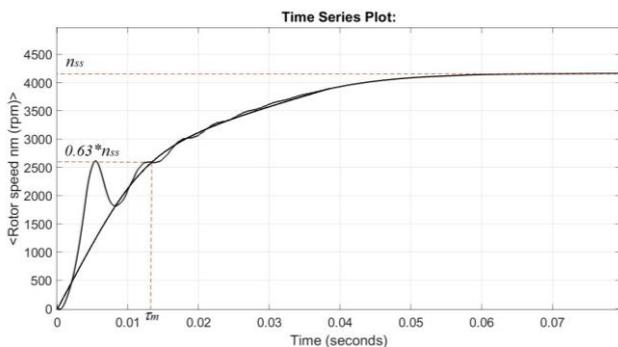


Рис. 1. Определение электромеханической постоянной времени по переходному процессу по скорости, полученному в Simulink

По переходному процессу по скорости, пользуясь уравнением (2) можно определить механическую постоянную времени, как показано на рис. 1. Значение механической постоянной времени, найденной по переходному процессу по скорости (рис. 1)  $\tau_m = 13.5$  мс.

Если значение электромеханической постоянной не приведено в паспортных данных двигателя, то его можно рассчитать по следующей формуле [5]:

$$\tau_m = R_a \cdot J_T / (K_e \cdot K_T) = 0.0062 \cdot 0.006 / (0.0524 \cdot 0.0524) = 0.0135 \text{ [c]},$$

где  $R_a$  – сопротивление обмотки статора,  $J_T$  – суммарный момент инерции,  $K_e$  – коэффициент ЭДС,  $K_T$  – постоянная момента.

С помощью переходного процесса по току можно, аналогично изложенному выше методу, используя уравнение вида (2), определить электромагнитную постоянную времени, как показано на рис. 2. Значение электромагнитной постоянной времени, найденной по переходному процессу по току (рис. 2),  $\tau = 12$  [мс].

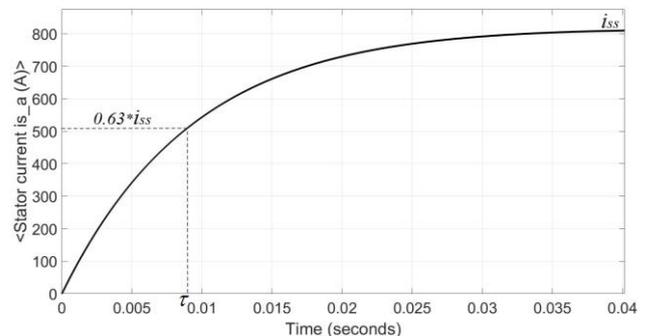


Рис. 2. Определение электромагнитной постоянной времени по переходному процессу по току в Simulink

Переходным процессом по току для БДПТ является первый импульс тока после пуска БДПТ при неподвижном роторе. Для того, чтобы при пуске осуществить имитацию фиксации ротора в неподвижном состоянии необходимо значительно увеличить значение момента инерции. Это увеличение производится вручную через окно параметров библиотечной модели СДПМ. При этом затягивается процесс разгона и значительно уменьшается величина противо-ЭДС в момент пуска.

Если значение электромеханической постоянной не приведено в паспортных данных двигателя, то его можно рассчитать по следующей формуле  $\tau = L/R = 68e-6 / 6.2e3 = 11$  мс. Это значение примерно совпадает со значением электромагнитной постоянной времени, найденным графически по переходному процессу (рис. 2,  $\tau = 9$  мс)

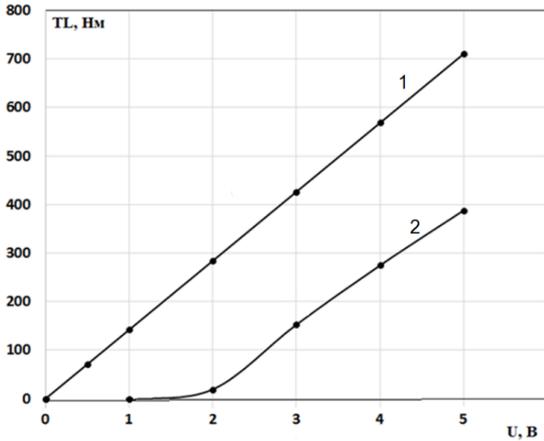
### III. ВЕРИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для верификации модели также можно сравнивать статические характеристики, полученные при моделировании, с паспортными данными.

При номинальном напряжении, частота ХХ должна совпадать с паспортной частотой ХХ ( $n_0$ ). На рис. 3 точка ХХ – это точка на кривой 1 при максимальном напряжении управления, равном 5В) При номинальном моменте частота вращения должна совпадать с паспортным значением номинальной частоты.

Для БДПТ возможна проверка правильности математической модели и схемы, составленной в Simulink,

с помощью анализа значения частоты пульсаций момента или скорости.



1) холостой ход, 2) при номинальной нагрузке

Рис. 3. Ругулировочные характкристики БДПТ

Когда число пар полюсов равно 1, за один электрический оборот датчик положения ротора принимает 6 состояний. При каждом состоянии положение вектора МДС статора остаётся неизменным на интервале времени между переключениями транзисторов (то есть, почти во всём диапазоне изменения угла в секторе, равном 60 электрическим градусам). При этом положение вектора магнитного потока ротора непрерывно изменяется, поскольку ротор вращается. Таким образом, имеет место периодическое изменение положения вектора МДС статора относительно вектора потока ротора. Поэтому число пульсаций электромагнитного момента двухполюсного двигателя ( $p=1$ ), внутри одного оборота ротора равно шести, при том, что  $T = F_s \Phi_r \sin(\theta_{mag})$ .

Для рассматриваемого, в качестве примера, двигателя типа НРМ48-5000 с числом пар полюсов  $p=4$ , и частотой вращения 4170 об/мин частота вращения в герцах составляет  $4170/60 \text{ об/сек} = 69.5 \text{ об/сек}$ .

Теоретическая (расчетная) частота пульсаций момента, выраженная в импульсах за секунду, вычисляется как:

$$f = p \cdot n [\text{об/сек}] \cdot 6 = 4 \times 69.5 \times 6 = 1668 \text{ [имп./сек]}$$

где  $f$  – частота пульсаций скорости и момента;  $p$  – число пар полюсов;  $n$  — скорость вращения [об/сек].

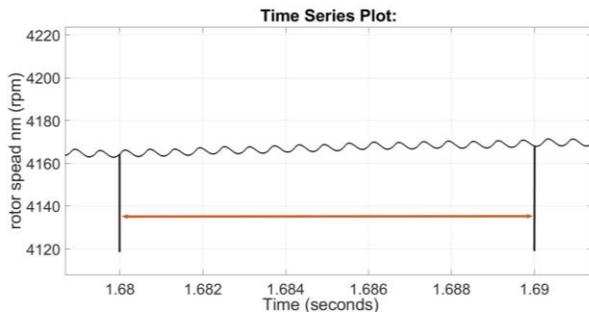


Рис. 4. Пульсации скорости БДПТ

Из рис. 4 видно, что за 0.01 с. происходят 16.7 пульсации. Это значит, что частота пульсации скорости и момента равно 1670 имп/с, что соответствует расчетному значению.

Таким образом, для верификации модели удобно проводить сравнение характерных точек статических и динамических характеристик, полученных при моделировании в Simulink, с паспортными данными двигателя и с результатами расчетов.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрено использование динамических и статических характеристик (характеристик переходного процесса по току, регулировочных характеристик), полученных при математическом моделировании, для верификации математического описания путём сравнения с паспортными данными.

Для проверки правильности математической модели применено определение электромеханической постоянной времени по переходному процессу по скорости и сравнение её с паспортным значением.

Аналогично, с помощью переходного процесса по току была определена электромагнитная постоянная времени и сравнена с паспортным значением.

Показано, что анализ пульсаций скорости двигателя (подсчёт значения частоты пульсаций при заданной скорости) позволяет проверить правильность работы модели при сравнении результатов моделирования с теоретической частотой пульсаций, значение которой следует из принципа действия бесконтактного двигателя постоянного тока.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Robert G.S. Verification and validation of simulation models. Winter Simulation Conference, 2011, no. 11, pp. 183-190.
- [2] Ming F.T., Tran P.Q., Bo F.W., Chung S.T. Model construction and verification of a BLDC motor using MATLAB/SIMULINK and FPGA control. IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. 2011, Vol 6, pp. 1791-1796.
- [3] Daw M.A. Mathematical model identification and verification of linear step motor. International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT'14) Proceedings. 2014, pp. 1-4.
- [4] Dynamic Test of Brushless DC Motor HPM48-5000. Available at: <https://goldenmotor.ru/files/HPM/HPM-5000-48V-Test.pdf> (accessed 06.01.2018)
- [5] Al-Mahturi F.Sh., Samokhvalov D.V., Bida V.M. Parameters identification of brushless DC motor by specification. IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). 2018, vol 161, pp. 2-4.