

Экспериментальная проверка модели асинхронной машины в рабочем спектре частот

А.М. Водовозов, канд. техн. наук, А.С. Елюков, асп.

Приведено экспериментальное исследование асинхронного двигателя в составе электропривода с векторным управлением, оценена невязка экспериментальных данных и результатов моделирования с использованием классической модели асинхронной машины, сформулированы предложения по повышению точности модели.

Ключевые слова: электропривод, асинхронная машина, математическая модель.

Experimental Model Test of Asynchronous Machine in Working Frequency Spectrum

A.M. Vodovozov, Candidate of Engineering, A.S. Elyukov, Post Graduate Student

The experimental research of the asynchronous engine as a part of the electric drive with vector control is presented. The authors estimate the discrepancy of experimental data and simulating results with the usage of the classical model of the asynchronous machine, and offer the ideas to increase the model accuracy.

Key words: electric drive, asynchronous machine, mathematical model.

Эксплуатация асинхронных машин на низких частотах, в 10 и более раз меньших номинальной, – обычная практика при создании широкодиапазонных электроприводов с векторным управлением. При этом на первый план зачастую выходят вопросы корректности использования в процессе расчетов классической математической модели асинхронной машины. Ввиду сложности механической части, которая в каждом конкретном случае имеет свои особенности, производители преобразователей частоты для асинхронных электроприводов зачастую не используют в математической модели машины уравнения механики и описание машины сводится к классическим уравнениям [1]:

$$u_s = R_s i_s + L_s i'_s + L_m i'_r, \quad (1)$$

$$0 = \frac{R_r}{s} i_r + L_r i'_r + L_m i'_s, \quad (2)$$

$$M_{эм} = p_\tau L_m \operatorname{Im}(i_s \bar{i}_r), \quad (3)$$

где u_s – напряжение питания статора; i_s – ток статора; i_r – ток ротора; $s = \frac{\omega_0 - \omega_r p_\tau}{\omega_0}$ – сколь-

жение; ω_0 – скорость вращения поля в электромагнитном зазоре; ω_r – скорость вращения ротора; $M_{эм}$ – электромагнитный момент; R_s, R_r – сопротивления статора и ротора; L_s, L_r, L_m – индуктивности статора и ротора, магнитная индуктивность; p_τ – число пар полюсов.

Приведенная модель описывает асинхронную машину в установившемся режиме.

Целью проведенных исследований являлась экспериментальная оценка невязки экспериментальных данных и результатов моделирования при работе асинхронного двигателя в комплекте с преобразователем частоты, обеспечивающим широкий диапазон регулирования

скорости. Предполагается, что погрешность между моделью и экспериментом возникает из-за неточности задания в модели паспортных параметров машины R_s, R_r, L_s, L_r, L_m , которые производитель всегда определяет в номинальном режиме работы.

Экспериментальное исследование проводилось на электроприводе, включающем в себя преобразователь частоты Omron VS F7, двигатель марки 5AI80B2Y3 с номинальными паспортными параметрами $R_s = 4,29$ Ом, $R_r = 2,76$ Ом, $L_m = 0,494$ Гн, $L_s = 0,502$ Гн, $L_r = 0,509$ Гн, $p_\tau = 1$. Исследовались процессы в установившемся режиме на холостом ходу на разных скоростях. В качестве независимых переменных использовались мгновенные значения токов и напряжений двигателя, а также скорость вращения ротора, полученная по данным программы CX-DRIVE, идущей в комплекте с преобразователем частоты и позволяющей наблюдать и настраивать преобразователь в режиме реального времени. Данные с датчиков тока оцифровывались аналого-цифровым преобразователем фирмы L-Card с частотой дискретизации 10^5 Гц, конвертировались в программу SCILAB, где и проводился численный анализ. Так как анализу подвергались установившиеся режимы, то из мгновенных значений токов и напряжений выбиралась информация о частоте, модуле напряжения и тока, а также фазовый сдвиг между напряжением и током. По этим данным вычислялся электромагнитный момент.

Приведение напряжений и токов от фазных значений к значениям, используемым в модели, выполнялось по формулам $u_s = 1,5 \cdot u_A$, $i_s = i_A$, где u_A – мгновенное значение фазного напряжения питания статора; i_A – мгновенное значение фазного тока статора.

Используя уравнения (1)–(2) в установленном режиме, вычислялись токи статора, которые сравнивались со значениями, полученными экспериментально. Полученные в результате эксперимента напряжения и токи фильтровались с помощью фильтра Фурье путем отсекания высокочастотной области спектра. Пример обработки сигналов на частоте 0,5 Гц можно наблюдать на рис. 1, 2.

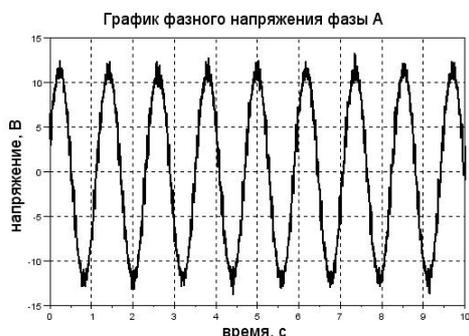


Рис. 1. График фазного напряжения фазы А на частоте вала $f = 0,5$ Гц до фильтрации

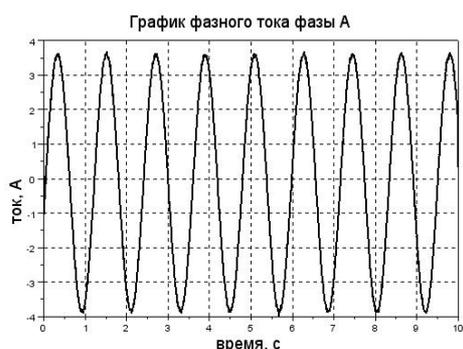


Рис. 2. График фазного тока фазы А на частоте вала $f = 0,5$ Гц после фильтрации

Сравнение токов, полученных расчетным и экспериментальным путем, производилось по двум составляющим: амплитуде и фазе. Результаты сравнения отражены на рис. 3, 4. За истинные значения принимались данные, полученные экспериментальным путем.

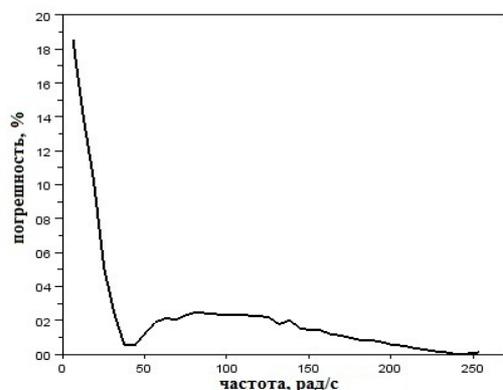


Рис. 3. Относительная погрешность оценки модуля тока статора асинхронной машины

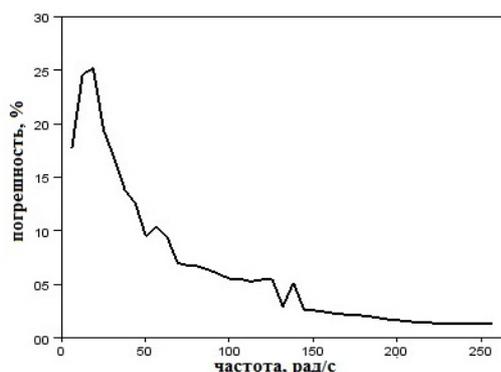


Рис. 4. Относительная погрешность оценки фазы тока статора асинхронной машины

Результаты исследований показывают, что погрешность оценки амплитуд и фаз токов, даже на скоростях, соответствующих диапазону 100, в данном конкретном случае не превышает 25 %. Несложно отметить возрастание погрешности на малых частотах.

Погрешность в определении токов влияет на точность как векторного, так и прямого управления моментом, так как в обоих случаях используется одна и та же математическая модель (1)–(3) [3]. Оценим ошибки при определении момента в случае наличия погрешности в оценке тока статора. Для электромагнитного момента справедлива формула

$$M_{эм} = \frac{p_{\tau}}{\omega} (|u_s| |i_s| \cos(\varphi) - R_s |i_s|^2). \quad (4)$$

Перепишав уравнение (4) в приращениях, получим формулу для вычисления относительной погрешности оценки электромагнитного момента:

$$\Delta M_{эм} = \frac{p_{\tau}}{\omega} (|u_s| \cos(\varphi) - 2R_s |i_s|) \Delta i_s, \quad (5)$$

где Δi_s – погрешность оценки тока статора; $\Delta M_{эм}$ – погрешность оценки электромагнитного момента. Результаты расчетов показаны на рис. 5.

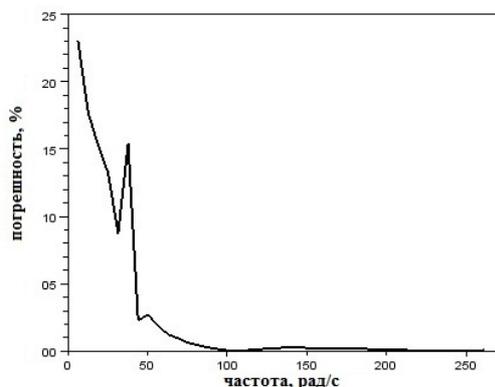


Рис. 5. Относительная погрешность оценки электромагнитного момента асинхронной машины

Погрешность в оценке момента является линейной функцией погрешности в оценке тока статора, поэтому график на рис. 5 качественно имеет тот же вид, что графики на рис. 3 и 4.

Все полученные зависимости показывают, что невязка модели и эксперимента более заметна на малых скоростях, где отклонение действительных параметров машины от ее паспортных данных более существенно.

Для уточнения параметров машины можно использовать различные методы параметрической идентификации. В качестве примера с этой целью были проведены опыты холостого хода и короткого замыкания на частоте 10 Гц. В результате были получены значения $R_s = 2,67$ Ом и $R_r = 3,25$ Ом, значительно отличающиеся от приведенных ранее паспортных данных. Относительная погрешность оценки модуля и фазы тока статора при использовании модели (1)–(3) с этими параметрами показана на рис. 6, 7.

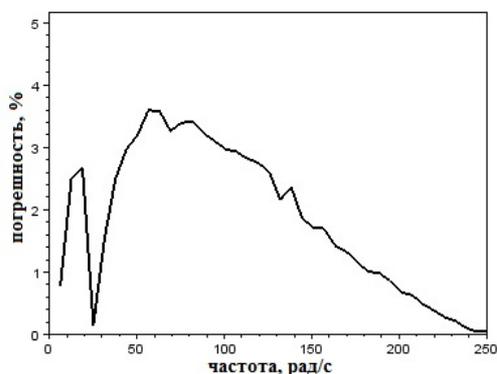


Рис. 6. Относительная погрешность оценки модуля тока статора асинхронной машины с уточненными значениями активных сопротивлений

Величина погрешности на полученных графиках не превышает 9 %.

Результаты проведенных исследований показывают, что математическая модель (1)–(3) на малых частотах имеет большие погрешности, чем на средних и номинальных. Но модель

вполне адекватна и может быть использована для анализа и моделирования асинхронного двигателя в широком диапазоне частот.

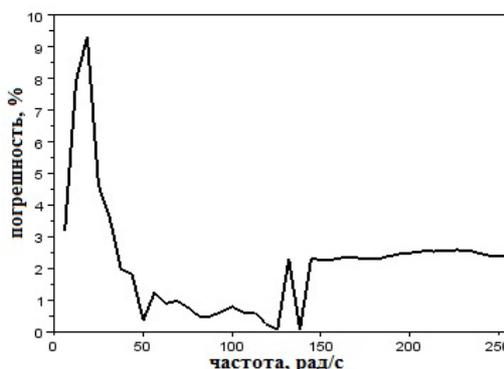


Рис. 7. Относительная погрешность оценки фазы тока статора асинхронной машины с уточненными значениями активных сопротивлений

Для повышения точности вычислений при использовании формул (1)–(3) на малых частотах необходимо учитывать изменения параметров машины в рабочих режимах и активно использовать различные алгоритмы идентификации параметров машины (например [4]).

Список литературы

1. Копылов И.П. Электрические машины. – М.: Высш. шк., 2002. – С. 242.
2. Козярук А.Е., Рудаков В.В., Народицкий А.Г. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов / под ред. А.Г. Народицкого. – СПб., 2004. – С. 66–85.
3. Водовозов А.М., Елюков А.С. О погрешности оценки потокосцепления асинхронной машины в системах векторного управления // Приводная техника. – 2010. – № 6. – С. 34–36.
4. Водовозов А.М., Елюков А.С. Идентификация параметров асинхронной машины в установившихся режимах // Вестник ИГЭУ. – 2010. – Вып. 2. – С. 69–71.

Работа выполнена при финансовой поддержке Аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» Министерства образования и науки РФ на 2009–2011 годы.

Водовозов Александр Михайлович,
Вологодский государственный технический университет,
кандидат технических наук, профессор, зав. кафедрой управляющих и вычислительных систем,
телефон (8172) 72-14-11,
адрес: г. Вологда, ул. Ленина, д.15,
e-mail: amv@mh.vstu.edu.ru

Елюков Александр Сергеевич,
Вологодский государственный технический университет,
аспирант, ассистент кафедры управляющих и вычислительных систем,
e-mail: aelyukov@yandex.ru