

УДК 622.23.05

Каширских Вениамин Георгиевич, доктор техн. наук, профессор

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

E-mail: kvg.ea@kuzstu.ru

**ОБОСНОВАНИЕ УПРОЩЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ**

***Аннотация:** Одним из наиболее предпочтительных в настоящее время направлений совершенствования электроприводов является использование современных информационных технологий и вычислительных средств. В статье рассматривается возможность упрощения математической модели асинхронного двигателя для проведения в процессе эксплуатации его динамической идентификации на основе поисковых методов оценивания. Для горного производства характерно непрерывное изменение условий эксплуатации, тяжелые режимы работы приводов горных машин, замена вышедших из строя электродвигателей, а также отсутствие специалистов для дополнительной настройки достаточно сложной системы динамической идентификации при возникающих изменениях. Упрощение математической модели асинхронного двигателя позволяет упростить поисковые методы оценивания и обеспечить требуемую устойчивость процессов оценивания без дополнительной настройки в производственных условиях. Применение методов оценивания позволяет в реальном времени вычислять текущие значения параметров и переменных величин асинхронного электродвигателя, которые затем могут быть использованы в системе управления электропривода с приданием ей новых возможностей, а также для использования в подсистемах диагностики и защиты электропривода от аварийных режимов. Работа вычислительных алгоритмов базируется на использовании математической модели двигателя и информации, содержащейся в измеряемых фазных токах и напряжениях статора. Актуальность этого вопроса определяется необходимостью совершенствования асинхронных электроприводов промышленных установок для повышения их эффективности, функциональной надежности и промышленной безопасности.*

***Ключевые слова:** электропривод, асинхронный электродвигатель, электромагнитные параметры, динамическая идентификация, оценивание параметров.*

***Информация о статье:** принята 11 ноября 2019 г.
DOI: 10.26730/1816-4528-2019-5-33-37*

Угледобывающая отрасль характеризуется высоким уровнем электропотребления, обусловленным использованием мощных и высокопроизводительных горных машин. При этом основными потребителями электроэнергии являются электроприводы очистных и проходческих комбайнов, скребковых и ленточных конвейеров, экскаваторов и других машин, производящих разрушение и транспортирование угля и горной массы, а также электроприводы стационарных машин горного производства: подъемных, вентиляционных и насосных установок.

Очевидно, что из-за тяжелых условий горного производства к электроприводам горных машин предъявляются особые требования по эффективности, экономичности, надежности, безопасности. Для большинства электроприводов горных машин характерен случайный резкопеременный циклический режим нагружения, приводящий из-за интенсивного накопления усталостных повреждений к повреждениям и поломкам механических элементов, а в электродвигателях – к тепловому и вибро-

механическому износу изоляции обмоток и другим неисправностям. Отказы электроприводов вызывают длительные простои оборудования, приводящие к значительному материальному ущербу и снижению в ряде случаев безопасности ведения горных работ.

Основным направлением повышения надежности и эффективности электроприводов горных машин в настоящее время является надлежащее управление состоянием электродвигателей во всех режимах работы на основе применения полупроводниковых преобразователей и информации о текущем состоянии электродвигателей. Состояние электродвигателей характеризуется совокупностью значений их параметров и переменных величин в данный момент времени. У асинхронных двигателей (АД) к ним относятся активные и индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора, взаимные индуктивности обмоток, потокосцепления магнитной цепи, частота вращения ротора.

Эти величины, кроме частоты вращения ротора, не поддаются прямому измерению, зависят от режима работы и теплового состояния двигателя и изменяются в широких пределах. В настоящее время возможен контроль состояния электродвигателей в реальном времени на основе их динамической идентификации, заключающейся в компьютерной обработке информации, содержащейся в напряжениях и токах электродвигателя, на базе математической модели электродвигателя и математических методов оценивания [1-5]. Использование в процессе управления всей совокупности или части перечисленных показателей, отражающих состояние электродвигателя в текущий момент времени, позволит проводить управление не «вслепую», а целенаправленно, для получения наилучших результатов.

Использование показателей текущего состояния электродвигателей позволит решить не только задачу эффективного управления электроприводом, но также вопросы энергосбережения и ресурсосбережения. Кроме того, появляется возможность создания на этой основе подсистем новых типов для оперативной диагностики и превентивной защиты электроприводов от аварийных режимов. Все это приведет в целом к повышению надежности и эффективности работы горных машин.

Вопросами разработки методов динамической идентификации асинхронных электродвигателей, которые в основном используются в подземных горных машинах, а также двигателей постоянного тока, применяемых на экскаваторах и буровых станках, в течение ряда последних лет занимается коллектив кафедры электропривода и автоматизации Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева. Полученные результаты приведены в наших публикациях [6-9].

Однако следует отметить, что для использования системы динамической идентификации в условиях горного производства с изменяющимися условиями эксплуатации и заменой вышедших из строя электродвигателей горных машин, а также при отсутствии на шахтах и разрезах специалистов данного профиля, необходимо упростить имеющиеся методы. Но в то же время процессы оценивания должны также оставаться устойчивыми и система идентификации не должна нуждаться в дополнительной настройке. Для этих целей нами разработан новый подход к процедуре идентификации, основанный на упрощении математической модели электродвигателя путем учета значимости ϵ параметров в разных режимах работы и использовании поисковых методов оценивания.

В качестве математической модели АД была использована широко применяемая для решения различных теоретических и практических задач математическая модель на основе уравнений двухфазной обобщенной электрической машины (ОЭМ) [10-15], которая в комплексной форме может быть представлена совокупностью следующих уравнений:

$$\begin{aligned} U_1 &= I_1 R_1 + \dot{\Psi}_1 + j\omega_k \Psi_1; & 0 &= I_2 R_2 + \dot{\Psi}_2 + j(\omega_k - p\omega_r)\Psi_2; \\ M &= p \operatorname{Im}(\Psi_1^* I_1); & \dot{\omega}_r &= \frac{1}{J}(M - M_c); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= I_1 L_1 + I_2 L_m; & \Psi_2 &= I_2 L_2 + I_1 L_m; \\ L_1 &= L_m + L_{1\sigma}; & L_2 &= L_m + L_{2\sigma}, \end{aligned}$$

где $U_1, U_2, I_1, I_2, \Psi_1, \Psi_2$ – соответственно векторы напряжений, токов и потокосцеплений обмоток статора и ротора; ω_k, ω_r – угловые частоты вращения координатных осей и ротора; R_1, R_2, L_1, L_2 – активные сопротивления и индуктивности обмоток статора и ротора; L_m – индуктивность цепи намагничивания; $L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$ – индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора; M – электромагнитный момент; M_c – момент сопротивления на валу; J – момент инерции ротора; p – число пар полюсов.

Здесь и далее индекс 1 соответствует принадлежности параметра или переменной к статору, а индекс 2 – к ротору. Индекс (*) показывает, что вектор является сопряженным, а точка над переменной обозначает ее производную. Обмотка ротора является приведенной к обмотке статора. Принятые допущения соответствуют стандартным допущениям ОЭМ.

Для упрощения процесса идентификации преобразуем математическую модель асинхронного электродвигателя к более удобному эквивалентному виду. Из уравнений для определения потокосцеплений статора и ротора получим зависимость $I_1 = (\Psi_1 - \frac{L_m}{L_m + L_{\sigma 2}} \Psi_2) / (L_{\sigma 1} + \frac{L_m}{L_m + L_{\sigma 2}} L_{\sigma 2})$, которая может быть записана в более простой форме: $I_1 = \frac{\Psi_1 - K_2 \Psi_2}{L'_1}$, (1)

где $K_2 = \frac{L_m}{L_m + L_{\sigma 2}}$ – коэффициент электромагнитной связи ротора;

$L'_1 = L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2} K_2$ – переходная индуктивность статора.

Аналогично получается выражение и для тока ротора:

$$I_2 = \frac{\Psi_2 - K_1 \Psi_1}{L'_2}, \quad (2)$$

где $K_1 = \frac{L_m}{L_m + L_{\sigma 1}}$ – коэффициент электромагнитной связи статора; $L'_2 = L_{\sigma 2} + L_{\sigma 1} K_1$ – переходная индуктивность ротора.

Для получения математической модели состояния асинхронного электродвигателя подставим выражение (2) в исходную математическую модель двигателя для неподвижной системы координат ($\omega_k=0$). После преобразований получим зависимость:

$$\dot{\Psi}_2 = -\frac{R_2}{L'_2} (\Psi_2 - K_1 \Psi_1) + jp\omega_r \Psi_2.$$

Выразим потокосцепление статора из (1) и получим математическую модель цепи измерения:

$$\Psi_1 = K_2 \Psi_2 + I_1 L'_1.$$

Вектор состояния x , расширенный параметрами, в этом случае может быть представлен в следующем виде:

$$x = [\Psi_{2\alpha} \quad \Psi_{2\beta} \quad \omega_r \quad R_2 \quad L'_2 \quad L'_1 \quad K_1 \quad K_2]^T.$$

В ходе экспериментов с различными вариантами структуры алгоритмов оценивания и различными вариантами математической модели было определено, что наиболее целесообразным является путь допустимого упрощения математической модели

Таблица 1. Сравнение расчетных параметров упрощенной и полной моделей

Параметры	Полная модель	Упрощенная модель	Расхождение, %
R_1 , Ом	2,075		-
R_2 , Ом	1,55		-
K_1	0,983	0,957	2,6
K_2	0,941		1,7
L'_1 , Гн	0,01336	0,01371	2,6
L'_2 , Гн	0,01396		1,8
$L_{\sigma 1}$, Гн	0,00303	0,00701	131
$L_{\sigma 2}$, Гн	0,011		36
L_m , Гн	0,175	0,156	11
$L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2}$, Гн	0,01403	0,01402	0,07

Таблица 2. Погрешности при замене полной модели на упрощенную модель

Тип двигателя	Погрешность, %			
	средняя		максимальная	
	Ψ_2	I_2	Ψ_2	I_2
4АМХ90L2У3	1,91	1,96	2,3	3,11
4АМ80А4СУ1	0,5	1,02	0,63	3,8
4А280М4У3	0,46	0,4	0,58	0,52

АД для снижения размерности вектора параметров и состояния.

Дополнительно к принятым для обобщенной электрической машины допущениям для этой математической модели АД введем следующие допущения. Поскольку индуктивность цепи намагничивания значительно больше индуктивности рассеяния, то коэффициенты электромагнитной связи будут близки к единице. При этом переходные индуктивности L'_1 и L'_2 будут примерно равны друг другу и равны сумме индуктивностей рассеяния статора и ротора. При оценивании параметров и переменных состояния электродвигателя величина индуктивности цепи намагничивания мало влияет на точность оценок из-за ее достаточно большого по сравнению с индуктивностями рассеяния значения, что справедливо практически для всех реальных асинхронных электродвигателей. Принятые допущения еще в большей степени справедливы для режимов работы АД с большими скольжениями при высоко динамичных переходных процессах, когда величина намагничивающего тока относительно мала.

Для оценки допустимости упрощения математической модели, основанного на принятии равными переходных индуктивностей статора и ротора и коэффициентов электромагнитной связи, были проведены вычислительные эксперименты. Моделировался процесс пуска, режим работы со статической нагрузкой и работа с резкопеременной нагрузкой.

Расчет потокосцепления ротора при этом производился по зависимости, полученной из (1):

$$\Psi_2 = \frac{\Psi_1 - L'_{11} I_1}{K_2},$$

а ток ротора определялся по зависимости (2). Значения переходных индуктивностей и

коэффициентов электромагнитной связи в этом случае соответствовали упрощенной модели электродвигателя. Параметры исходной модели, использованные при моделировании электродвигателя АМХ90L2У3, а также параметры упрощенной модели для сравнения приведены в табл. 1. Средние и максимальные погрешности вычисления потокосцепления и тока ротора при использовании упрощенной модели, нормированные относительно их значений в режиме работы с номинальной нагрузкой, представлены для трех типов электродвигателей в табл. 2.

Аналогичные результаты были получены и при моделировании процессов для других электродвигателей. Во всех случаях средняя погрешность не превысила 2%, а максимальная – 5%. Из анализа результатов моделирования следует, что относительно большие изменения индуктивности цепи намагничивания и индуктивностей рассеяния соответствуют относительно малым изменениям переходных индуктивностей и коэффициентов электромагнитной связи, а следовательно, малым ошибкам при определении потокосцепления и тока ротора – порядка 2-3%.

Из табл. 1 следует, что, несмотря на большую разницу между индуктивностями рассеяния полной и упрощенной модели, их сумма практически одинакова и именно это определяет небольшую разницу в значениях переходных индуктивностей моделей.

Полученные результаты подтверждают, что уменьшение размерности вектора состояния и параметров электродвигателя путем принятия равными друг другу переходных индуктивностей и коэффициентов электромагнитной связи статора и ротора является допустимым. Проведенные

вычислительные эксперименты не только подтверждают допустимость применения упрощенной модели в решении задачи оценивания параметров и переменных состояния асинхронного электродвигателя, но и подтверждают целесообразность ее применения.

Разработанная система идентификации представляет собой совокупность наблюдающих устройств, реализованных в виде программного обеспечения, позволяющих путем компьютерных вычислений определять в реальном времени текущие значения искоемых величин, которые обычным образом измерить чрезвычайно трудно или невозможно. Работа вычислительных алгоритмов базируется на использовании математической модели двигателя и информации, содержащейся в измеряемых фазных токах и напряжениях статора. Максимальное время определения одной величины при этом составляет от 20 до 100 мс, а погрешность определения параметров, которые для сравнения можно измерить, находится в пределах 5%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния. - М.: Мир, 1975.-687 с.
2. Mansouri, M.M., H.N. Nounou and M.N. Nounou, 2014. Nonlinear control and estimation in induction machine using state estimation techniques. Systems Science & Control Engineering, 2(1): 642-654.
3. Kojooyan-Jafari, H., L. Monjo, F. Corcoles and J. Pedra, 2014. Parameter Estimation of Wound-Rotor Induction Motors From Transient Measurements. Energy Conversion, IEEE Transactionson (issue 29 (2)), IEEE, pp: 300-308.
4. Справочник по теории автоматизированного управления / Под ред. А.А. Красовского.- М.: Наука, 1987. - 712 с.
5. Ли Р. Оптимальные оценки, определение характеристик и управление. - Наука, 1996. - 176 с.
6. Каширских В.Г. Структура информационно-вычислительного комплекса для асинхронных электроприводов / В.Г. Каширских, А.В. Нестеровский, А.П. Носков // Вестн. КузГТУ, 2012.- № 4.- С. 139-141.
7. Каширских В.Г. Определение параметров асинхронных электродвигателей в процессе их работы // Вестник КузГТУ. 2015, № 5. С. 96-102.
8. Каширских В.Г. Компьютерная система для функциональной диагностики электроприводов карьерных экскаваторов / В.Г. Каширских, А.Н. Гаргаев, В.М. Завьялов, И.Ю. Семькина // Вестник КузГТУ, 2016, №6, С. 159-168.
9. Gargaev A.N. The observer of a direct-current motor condition on the basis of the particles swarm method / A.N. Gargaev, V.G. Kashirskikh1, A.G. Zakharova and V.A. Borovtsov // EAI Endorsed Transactions on Energy Web. – 2019. – 4 pp.
10. Крон Г. Тензорный анализ сетей: Пер. с англ. / Под ред. Л.Т. Кузина, П.Г. Кузнецова. - М.: Советское радио, 1978. - 720 с.
11. Ковач К. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. Ковач, И. Рац.-М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. - 744 с.
12. Уайт Д. Электромеханическое преобразование энергии / Д. Уайт, Г. Вудсон. - М.-Л.: Энергия, 1964.-527 с.
13. Хэнкок Н. Матричный анализ электрических машин. - М.: Энергия, 1967. - 225 с.
14. Фильц Р.В. Математические основы теории электромеханических преобразователей. - Киев: Наукова думка, 1979. - 205 с.
15. Ключев В.И. Теория электропривода. - М.: Энергоатомиздат, 2001. - 704 с.

Veniamin G. Kashirskikh, Dr. Sc. in Engineering, Professor

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya street, Kemerovo, 650000, Russian Federation

REASONS FOR SIMPLIFYING THE MATHEMATICAL MODEL OF INDUCTION MOTOR FOR DYNAMIC IDENTIFICATION

Abstract: Currently, one of the most preferred areas of improvement in electric drives is the use of modern information technologies and computing tools. The article considers the possibility of simplifying the mathematical model of the induction motor for carrying out its dynamic identification in the course of operation on the basis of search methods of evaluation. Mining production is characterized by continuous change of operating conditions, heavy operation modes of mine machine drives, replacement of failed electric motors, as well as lack of specialists for additional adjustment of a rather complex system of dynamic identification in case of changes. Simplification of the mathematical model of the induction motor makes it possible to simplify search methods of evaluation and to ensure the required stability of assessment processes without additional adjustment in production conditions. Application of estimation methods allows us to calculate the current values of induction motor parameters which then can be used in an electric drive control system, also in subsystems of diagnostics and protection of the electric drive against emergency operation in real time. Work of computing algorithms is based on use of induction motor mathematical model and information contained in the measured currents and stator voltages. Relevance of this aspect is defined by the need to improve induction motor drives by increasing their efficiency, functional reliability and industrial safety.

Keywords: electric drive, induction motor, electromagnetic parameters, dynamic identification, parameters estimation.

Article info: received November 11, 2019

DOI: 10.26730/1816-4528-2019-5-33-37

REFERENCES

1. Ejjkhoff P. Osnovy identifikacii sistem upravleniya. Ocenivanie parametrov i sostoyaniya. - M.: Mir, 1975.-687 s.
2. Mansouri, M.M., H.N. Nounou and M.N. Nounou, 2014. Nonlinear control and estimation in induction machine using state estimation techniques. *Systems Science & Control Engineering*, 2(1): 642-654.
3. Kojooyan-Jafari, H., L. Monjo, F. Corcoles and J. Pedra, 2014. Parameter Estimation of Wound-Rotor Induction Motors From Transient Measurements. *Energy Conversion, IEEE Transactionson* (issue 29 (2)), IEEE, pp: 300-308.
4. Spravochnik po teorii avtomatizirovannogo upravleniya / Pod red. A.A. Krasov-skogo.- M.: Nauka, 1987. - 712 s.
5. Li R. Optimal'nye ocenki, opredelenie harakteristik i upravlenie. - Nauka, 1996. - 176 s.
6. Kashirskih V.G. Struktura informacionno-vychislitel'nogo kompleksa dlya asinhronnyh elektropriwodov / V.G. Kashirskih, A.V. Nesterovskij, A.P. Noskov // *Vestn. KuzGTU*, 2012.- № 4.- S. 139-141.
7. Kashirskih V.G. Opredelenie parametrov asinhronnyh elektrodvigatelej v pro-cesse ih raboty // *Vestnik KuzGTU*. 2015, № 5. S. 96-102.

8. Kashirskih V.G. Komp'yuternaya sistema dlya funkcional'noj diagnostiki elek-troprivodov kar'ernyh ekskavatorov / V.G. Kashirskih, A.N. Gargaev, V.M. Zav'ya-lov, I.YU. Semykina // *Vestnik KuzGTU*, 2016, №6, S. 159-168.

9. Gargaev A.N. The observer of a direct-current moto condition on the basis of the particles swarm method / A.N. Gargaev, V.G. Kashirskikh1, A.G. Zakh-arova and V.A. Borovtsov // *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*. – 2019. – 4 pp.

10. Kron G. Tenzornyj analiz setej: Per. s angl. / Pod red. L.T. Kuzina, P.G. Kuzne-cova. - M.: Sovetskoe radio, 1978. - 720 s.

11. Kovach K. Perekhodnye processy v mashinah peremennogo toka / K. Kovach, I. Rac.-M.-L.: Gosenergoizdat, 1963. - 744 s.

12. Uajt D. Elektromekhanicheskoe preobrazovanie energii / D. Uajt, G. Vudson. - M.-L.: Energiya, 1964.-527 s.

13. Henkok N. Matrichnyj analiz elektricheskikh mashin. - M.: Energiya, 1967. - 225 s.

14. Fil'c R.V. Matematicheskie osnovy teorii elektromekhanicheskikh preobrazovate-lej. - Kiev: Naukova dumka, 1979. - 205 s.

15. Klyuchev V.I. Teoriya elektropriwoda. - M.: Energoatomizdat, 2001. - 704 s.

Библиографическое описание статьи

Каширских В.Г. Обоснование упрощения математической модели асинхронного электродвигателя для динамической идентификации // *Горное оборудование и электромеханика* – 2019. – № 5 (145). – С. 33-37.

Reference to article

Kashirskikh V.G. Reasons for simplifying the mathematical model of induction motor for dynamic identification. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2019, no. 5 (145), pp. 33-37.