
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.313.333.2:62-503.56

DOI 10.46960/2658-6754_2022_2_04

**АНАЛИЗ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ
С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ
С ОПТИМИЗАЦИЕЙ ПО МИНИМУМУ ТОКА СТАТОРА****А.А. Попов**

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет
Саранск, Россия
e-mail: alalpopov91@mail.ru

Г.Б. Онищенко

ООО «Научно-технический центр Приводная Техника»
Москва, Россия
e-mail: eapu@mail.ru

И.В. Гуляев

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет
Саранск, Россия
e-mail: ivgulyaev@mail.ru

Достижения в развитии силовых полупроводниковых приборов (СПП) и микропроцессорной техники позволяют повышать эффективность современных систем управления электроприводом. Во многих промышленных и транспортных секторах в широком диапазоне напряжений и мощностей одним из самых распространенных является регулируемый электропривод с применением асинхронного двигателя (АД). Одной из основных задач управления АД является управление положения рабочей точки машины, т.е. управление крутящим моментом и потокосцеплением ротора. Требования к крутящему моменту АД определяются областью его применения, но в случае, когда машина работает не на пределе своего крутящего момента, сохраняется свобода выбора уровня потока ротора, что дает дополнительные преимущества в управлении электроприводом.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, динамика электропривода, МТРА, моделирование, энергоэффективное управление.

Для цитирования: Попов А.А., Онищенко Г.Б., Гуляев И.В. Анализ быстродействия системы управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором с оптимизацией по минимуму тока статора // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 2. С. 4-15. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_2_04

ANALYSIS OF PERFORMANCE OF CONTROL SYSTEM FOR SQUIRREL-CAGE INDUCTION MOTOR WITH OPTIMIZATION FOR MINIMUM OF STATOR CURRENT

A.A. Popov

National Research Mordovia State University
Saransk, Russia
e-mail: alalpopov91@mail.ru

G.B. Onishchenko

LLC "Scientific and Technical Center Drive Technology"
Moscow, Russia
e-mail: eapu@mail.ru

I.V. Gulyaev

National Research Mordovia State University
Saransk, Russia
e-mail: ivgulyaev@mail.ru

Abstract. Modern advances in the development of power semiconductor devices (PSD) and microprocessor technology make it possible to increase the efficiency of modern electric drive control systems. In many industrial and transport sectors in a wide range of voltages and powers, one of the most common can be considered a controlled electric drive using an induction motor (IM). One of the main tasks of IM control is to control the position of the operating point of the machine, i.e., control of torque and rotor flux linkage. The requirements for the torque of the IM are determined by the scope of its application, but in the case when the machine does not operate at the limit of its torque, the freedom to choose the level of the rotor flux remains, which gives additional advantages in the control of the electric drive.

Key words: induction drive, electric drive dynamics, MTPA, simulation, energy efficient control.

For citation: A.A. Popov, G.B. Onishchenko and I.V. Gulyaev, "Analysis of performance of control system for squirrel-cage induction motor with optimization for minimum of stator current", *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 4-15, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_04

1. Введение

Одним из базовых методов управления асинхронным двигателем (АД) с короткозамкнутым ротором является использование полеориентированного управления (ПОУ). Наиболее распространено ПОУ с номинальным значением потокоцепления ротора и скоростью ниже номинальной при соблюдении закона $1/\omega_r$ (или аналогичного) в области ослабления поля. Такой подход к управлению позволяет повысить динамику электропривода, но повышает потери, что не лучшим образом влияет на энергоэффективность электропривода при длительной работе или при работе с малыми нагрузками на валу [1-4]. Для повышения энергоэффективности можно снизить потокоцепление ротора в таких режимах, но это повлечет за собой снижение динамики [1-4].

Для достижения баланса между быстродействием и энергоэффективностью можно использовать метод управления по максимуму момента на единицу тока (*maximum torque per ampere* – *МТРА*). На рис. 1 показана оптимальная траектория токов при стратегии *МТРА* (без учета потерь).

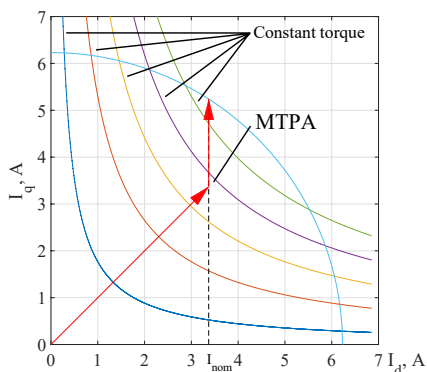


Рис. 1. Траектория токов при стратегии *МТРА*

Fig. 1. Current trajectory for *МТРА* strategy

В [5] выполнено сравнение работы алгоритмов управления на базе *МТРА* и системы управления с поддержанием постоянного потокоцепления ротора. На текущий момент стратегия управления *МТРА* рассматривает только установившиеся режимы работы электропривода, но с учетом потерь и изменений основных параметров машины во время работы. Влияние переходных процессов в системе управления *МТРА* и ее влияние на динамику электропривода изучаются.

Для повышения динамики электропривода при управлении *МТРА*

требуется форсировать процесс намагничивания ротора АД с короткозамкнутым ротором, за счет имеющегося запаса по току. Для обеспечения баланса между энергетической эффективностью и динамикой электропривода можно использовать регулятор потока в системе управления, схема системы управления представлена на рис. 2.

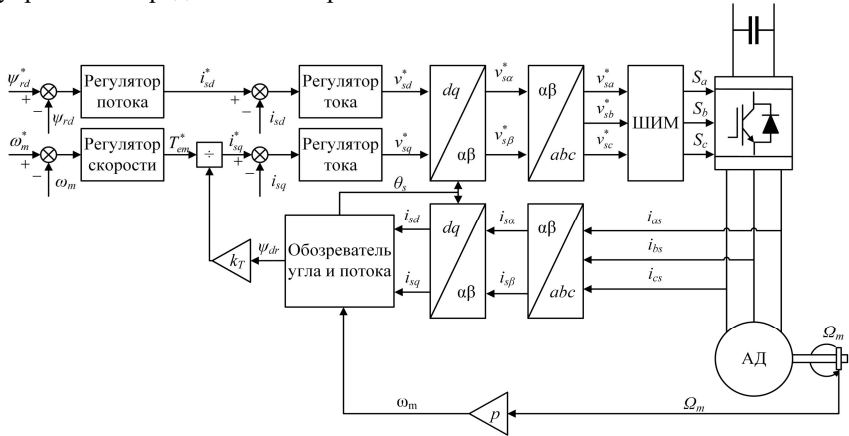


Рис. 2. Система управления с МТРА регулятором потока

Fig. 2. Control system with MTPA flux controller

Максимальная энергоэффективность электропривода будет достигнута только в установившихся режимах работы. В таком случае необходимую величину тока по оси d можно определить по формуле:

$$i_{sd} = \frac{\psi_r}{L_m}, \quad (1)$$

где ψ_r – потокосцепление ротора; L_m – индуктивность намагничивания.

По результатам математического моделирования предлагаемых методов было проведено сравнение двух систем управления с применением стратегии МТРА без регулятора потока и с применением регулятора. Моделирование проводилось на базе модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором *ABB M2A100LC4* мощностью 2,2 кВт.

При исследовании рабочих характеристик АД с использованием уравнений электрического равновесия были приняты следующие допущения:

1) все обмотки АД симметричны и имеют одинаковые параметры;

- 2) распределение МДС принимается синусоидальным;
- 3) насыщение магнитной системы не учитывается;
- 4) не учитываются магнитные и механические потери.

Для моделирования работы АД в среде *MATLAB* использовались уравнения асинхронного двигателя в синхронной вращающейся системе координат, ориентированной по потокоцеплению ротора:

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_s \sigma L_s i_{sq} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\psi_{rd}}{dt}; \quad (2)$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_s \sigma L_s i_{sd} + \omega_s \frac{L_m}{L_r} \psi_{rd}; \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{1 - L_m^2}{L_s L_r}, \quad (4)$$

где u_{sd} и u_{sq} – потокоцепления ротора в синхронной вращающейся системе координат dq ; R_s – сопротивление статора; i_{sd} и i_{sq} – токи статора в синхронной вращающейся системе координат dq ; L_s – индуктивность статора; L_r – индуктивность ротора; ψ_{rd} и ψ_{rq} – потокоцепление ротора в синхронной вращающейся системе координат dq .

На представленных далее графиках основные величины: i_d и i_q – токи статора в синхронной вращающейся системе координат dq ; i_{mr} – ток намагничивания ротора и T_{em} – электромагнитный крутящий момент; указаны в относительных единицах и рассчитываются как отношение текущего значения к номинальному значению величины. Номинальные значения величин приведены в табл. 1.

Таблица 1.
Параметры модели АД ABB M2AA100LC4

Table 1.
Parameters of the ABB M2AA100LC4 IM model

Параметр	Значение
Ток оси d I_d , А	3,37
Ток оси q I_q , А	5,24
Ток намагничивания I_{mr} , А	3,37
Сопротивление статора R_s , Ом	2,35
Сопротивление ротора R_r , Ом	1,99
Индуктивность статора L_s , Гн	0,295
Индуктивность ротора L_r , Гн	0,295
Индуктивность намагничивания L_m , Гн	0,284

При моделировании рассматривались два случая:

- 1) изменение команды момента от текущего значения к номинальной величине крутящего момента, результаты моделирования приведены на рис. 3 (а) и (б);
- 2) изменение команды момента от текущего значения к 0,7 от номинальной величины крутящего момента, результаты моделирования приведены на рис. 4(а) и 4(б).

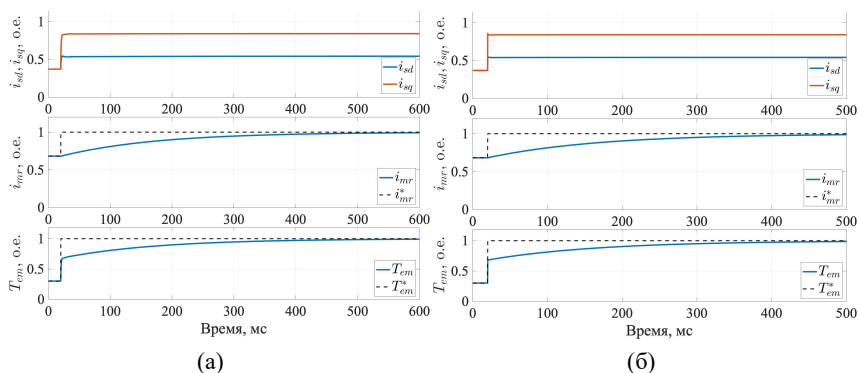


Рис. 3. Результаты моделирования АД с МТРА ниже номинального потока от 0,3 до номинального момента: без регулятора потока (а); с регулятором потока (б)

Fig. 3. IM with MTPA below nominal flux simulation results from 0,3 to nominal torque: without flux controller (a); with flux controller (b)

При рассмотрении результатов моделирования первого случая можно отметить практически идентичную динамику обеих систем управления, ввиду того что в данном случае динамика зависит только от скорости намагничивания ротора электродвигателя. Во втором рассматриваемом случае система управления, в которой применен регулятор потока, показывает большую динамику в сравнении с системой без такого регулятора. Такое поведение можно объяснить тем, что в данном случае регулятор потока способен использовать запас по току, чтобы форсировать намагничивание ротора электродвигателя.

II. Альтернативный метод управления

Так как для максимальной динамики требуется поддержание пото-

косцепления ротора на скоростях ниже номинальной равным его номинальному значению, а для повышения энергоэффективности нужно поддерживать его значение ниже этого значения, то можно предположить, что есть некое компромиссное решение. Данное решение должно обеспечивать энергоэффективность в установившихся режимах в соответствии со стратегией *МТРА* и обеспечивать достаточную динамику при переходе из одного установившегося режима в другой.

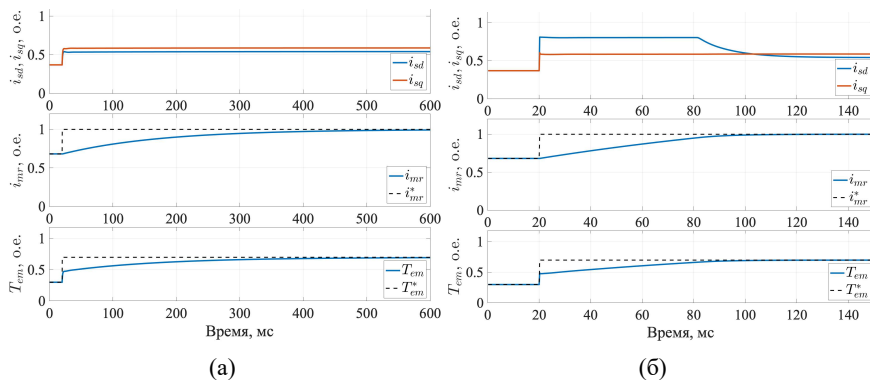


Рис. 4. Результаты моделирования АД с *МТРА* ниже номинального потока от 0,3 до 0,7 от номинального момента: без регулятора потока (а); с регулятором потока (б)

Fig. 4. IM with MTPA below nominal flux simulation results from 0,3 to 0,7 of nominal torque: without flux controller (a); with flux controller (b)

Как уже отмечалось ранее, для повышения динамики энергоэффективного управления необходимо максимально быстро намагнитить ротор, т.к. ток по оси q может измениться практически мгновенно, а вот ток намагничивания ротора – не может. Но одновременное нарастание крутящего момента и потокосцепления ротора может отразиться на системе управления таким образом, что реакция регуляторов будет отличаться от ожидаемой [6–10]. Это связано с наличием ограничений по току и напряжению используемого преобразователя частоты.

При работе в области низких скоростей ограничениями по напряжению можно пренебречь. Рассматривая работу на низких скоростях, можно предложить два варианта увеличения скорости намагничивания ротора:

1) при изменении команды момента сохранить ток по оси q без изменений

до момента достижения потокосцепления ротора необходимого значения, для чего можно использовать весь запас по току для увеличения тока по оси d . После чего значения токов по осям d и q установить в соответствии с расчетными значениями для заданной команды момента. Результаты моделирования представлены на рис. 5, а, где i_{mr} отвечает за динамику потока ротора;

- 2) при изменении команды момента сохранить крутящий момент без изменений до момента достижения потокосцепления ротора необходимого значения, для чего можно использовать весь запас по току для увеличения тока по оси d . После чего значения токов по осям d и q установить в соответствии с расчетными значениями для заданной команды момента. Результаты моделирования представлены на рис. 5, б, где i_{mr} отвечает за динамику потока ротора.

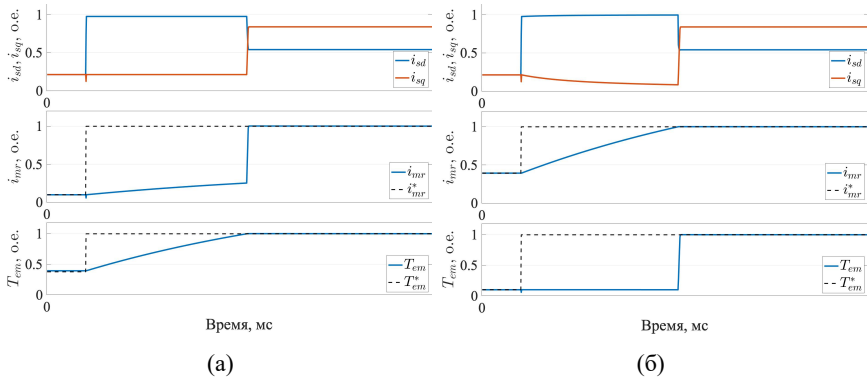


Рис. 5. Реакция потока и момента на изменение команды управления при использовании двух алгоритмов работы: поддержание постоянного тока по оси q (а); поддержание постоянного момента (б)

Fig. 5. Response of the flux and torque to a change in the control command when using two operation algorithms: maintaining a constant current along the q axis (a); maintaining a constant moment (b)

В приведенных результатах моделирования нагрузка на двигателе составляет 10 % от номинального значения с токами $i_d = i_q$ в соответствии со стратегией управления *МТРА*, через 20 мс нагрузка (команда момента) увеличивается до номинального значения.

Данные результаты показывают, что оба предложенных варианта

позволяют существенно увеличить динамику электропривода, но при этом появляется резкий скачок крутящего момента. Подобное резкое изменение крутящего момента может пагубно повлиять на механические составляющие электропривода. Для исправления данной ситуации может быть целесообразным использование постепенно нарастающей команды момента, например, в виде наклонной прямой, что уменьшит механическую нагрузку на электропривод, но увеличит время достижения заданного момента.

III. Экспериментальные результаты

Предложенные алгоритмы были экспериментально проверены на асинхронном двигателе мощностью 2,2 кВт. Испытательный стенд также включает в себя синхронную машину с постоянными магнитами ДСМ71-2,2-1500, работающую в качестве нагрузки и датчик момента DR-2643. В качестве источников питания двигателей используются два преобразователя частоты с открытой программной платформой на базе микроконтроллера TMS320F28335. На рис. 6 (а) представлены экспериментальные данные для алгоритма, поддерживающего ток по оси q постоянным до намагничивания ротора. На рис. 6 (б) представлены экспериментальные данные для алгоритма, поддерживающего крутящий момент постоянным до намагничивания ротора. На рис. 6 (в) представлены экспериментальные данные для алгоритма, рассчитывающего команду крутящего момента в виде наклонной прямой.

Сравнивая экспериментальные данные с данными моделирования, можно отметить, что результаты, полученные на экспериментальной установке, показывают достоверность разработанного алгоритма управления.

III. Выводы

Проведен анализ быстродействия системы управления АД с оптимизацией по минимуму тока статора с применением регулятора потока и без. Установлено, что динамика крутящего момента зависит от величины команды управления крутящим моментом. В случае, когда команда момента равна номинальному значению, динамика изменения момента почти одинакова, при команде момента меньше номинального значения, система управления с регулятором потока обладает наилучшей динамикой. Предложены несколько алгоритмов, которые позволяют использовать имеющийся запас тока для форсирования намагничивания ротора АД. В момент изменения команды управления крутящим моментом АД один алгоритм старается поддерживать начальное значение момента, а другой ток по оси q до тех пор, пока магнитный поток ротора не достигнет необходимого значения. После достижения потоком ротора требуемого значения, команды управления токов устанавливаются в соответствии с заданными значениями для установленного режима. Данные алгоритмы позволяют добиться высокой динамики крутящего момента, что создает резкий скачок момента на валу АД и

плохо сказывается на механической трансмиссии привода. Исходя из этого, предложено использовать профилированную команду управления моментом в виде наклонной прямой. Экспериментальные исследования подтвердили теоретическую составляющую предложенных методов.

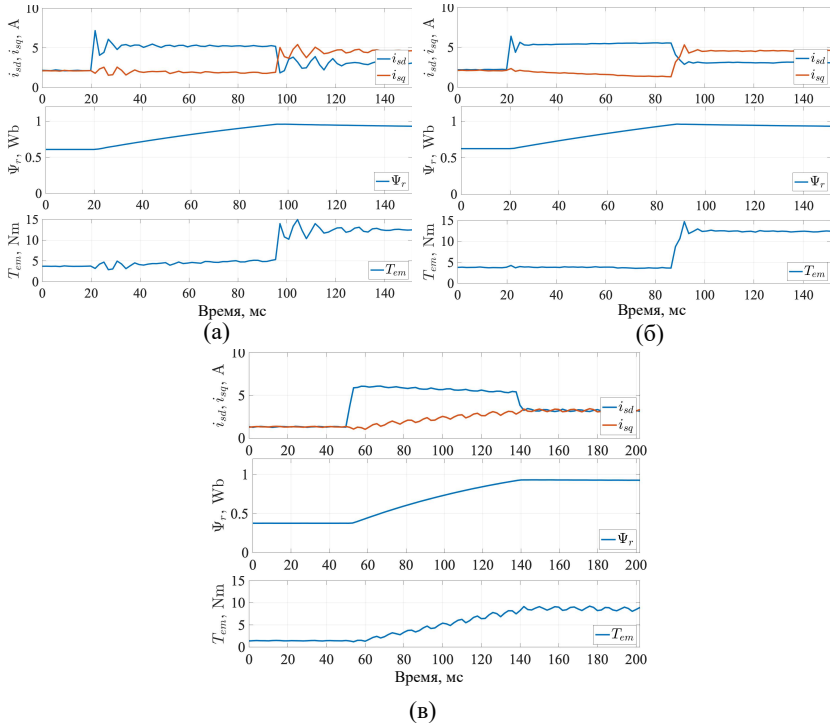


Рис. 6. Экспериментальные данные для трех алгоритмов работы: поддержание постоянного тока по оси q (а); поддержание постоянного момента (б); использование команды момента в виде наклонной прямой (в)

Fig. 6. Experimental results when using two operation algorithms: maintaining a constant current along the q axis (a); maintaining a constant moment (b); using torque ramp command (c)

© Попов А.А., 2022
 © Онищенко Г.Б., 2022
 © Гуляев И.В., 2022

Поступила в редакцию 28.03.2022
 Received 28.03.2022

Библиографический список

- [1] Tsai M.S., Wu M.J., Tu T.C., Chou B.Y. Implementation of maximum torque per amperage control using estimation technique of rotor time constant // proc. CACS International Automatic Control Conference (CACS), Dec. 2-4, 2013, Sun Moon Lake, Taiwan. IEEE, 2013. pp. 278-281. DOI: 10.1109/CACS.2013.6734146
- [2] Kwon C., Suhdooff S.D. An adaptive maximum torque per ampere control strategy // IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, May 15, 2005, San Antonio, TX, USA. IEEE, 2005. P. 783-788. DOI: 10.1109/IEMDC.2005.195811
- [3] Hrkel M., Vittek J., Biel Z. Maximum torque per ampere control strategy of induction motor with iron losses // 2012 ELEKTRO, May 21-22, 2012, Rajecké Teplice, Slovakia. IEEE, 2012. pp. 185-190. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2012.6225635
- [4] Bozhko S., Dymko S., Kovbasa S., Peresada S.M., Maximum torque-per-ampere control for traction in drives: Theory and experimental results // IEEE Transactions on Industry Applications. 2017. Vol. 53. No. 1. P. 181-193. DOI: 10.1109/TIA.2016.2608789
- [5] Kwon C. Study on an adaptive maximum torque per amp control strategy for induction motor drives // Journal of Electrical Engineering and Technology. 2013. Vol. 8. No. 1. P. 110-117. DOI: 10.5370/JEET.2013.8.1.110
- [6] Briz F., Diez A., Degner M.W., Lorenz R.D. Current and flux regulation in field-weakening operation [of induction motors] // IEEE Transactions on Industry Applications. 2001. Vol. 37. No 1. P. 42-50. DOI: 10.1109/28.903125
- [7] Harnefors L., Pietilainen K., Gertmar L. Torque-maximizing field-weakening control: design, analysis, and parameter selection // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2001. Vol. 48. No 1. P. 161-168. DOI: 10.1109/41.904576
- [8] Kim S.-H., Sul S.-K. Maximum torque control of an induction machine in the field weakening region // IEEE Transactions on Industry Applications. 1995. Vol. 31. No 4. P. 787-794. DOI: 10.1109/28.395288
- [9] Kwon Y.-C., Kim S., Sul S.-K. Six-step operation of PMSM with instantaneous current control // IEEE Transactions on Industry Applications. 2014. Vol. 50. No 4. P. 2614-2625. DOI: 10.1109/TIA.2013.2296652
- [10] Vasilios I.C., Nikolaos M.I. A novel SVPWM overmodulation technique based on voltage correcting function // proc. 2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), June 25-28, 2012, Aalborg, Denmark. IEEE, 2012. P. 682-689. DOI: 10.1109/PEDG.2012.6254076

References

- [1] M.S. Tsai, M.J. Wu, T.C. Tu and B.Y. Chou, "Implementation of maximum torque per amperage control using estimation technique of rotor time constant", in proc. *CACS International Automatic Control Conference (CACS)*, Dec. 2-4, 2013, Sun Moon Lake, Taiwan, pp. 278-281. DOI: 10.1109/CACS.2013.6734146
- [2] C. Kwon and S.D. Suhdooff, "An adaptive maximum torque per ampere control strategy", in. proc. *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*, May 15, 2005, San Antonio, TX, USA, pp. 783-788. DOI: 10.1109/IEMDC.2005.195811

- [3] M. Hrkel, J. Vittek and Z. Biel, "Maximum torque per ampere control strategy of induction motor with iron losses", in proc. *2012 ELEKTRO*, May 21-22, 2012, Ra-jecke Teplice, Slovakia, pp. 185-190. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2012.6225635
- [4] S. Bozhko, S. Dymko, S. Kovbasa and S.M. Peresada, "Maximum torque-per-ampere control for traction in drives: Theory and experimental results", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 1, pp. 181-193, Jan.-Feb. 2017. DOI: 10.1109/TIA.2016.2608789
- [5] C. Kwon, "Study on an adaptive maximum torque per amp control strategy for induction motor drives", *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 110-117, Jan. 2013. DOI: 10.5370/JEET.2013.8.1.110
- [6] F. Briz, A. Diez, M.W. Degner and R.D. Lorenz, "Current and flux regulation in field-weakening operation [of induction motors]", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 37, no 1, pp. 42-50, Jan.-Feb. 2001. DOI: 10.1109/28.903125
- [7] L. Harnefors, K. Pietilainen and L. Gertmar, "Torque-maximizing field-weakening control: design, analysis, and parameter selection", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 48, no 1, pp. 161-168, Fed. 2001. DOI: 10.1109/41.904576
- [8] S.-H. Kim and S.-K. Sul, "Maximum torque control of an induction machine in the field weakening region", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, no 4, pp. 787-794, July-Aug. 1995. DOI: 10.1109/28.395288
- [9] Y.-C. Kwon, S. Kim and S.-K. Sul, "Six-step operation of PMSM with instantaneous current control", *Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no 4, pp. 2614-2625, July-Aug. 2014. DOI: 10.1109/TIA.2013.2296652
- [10] I.C. Vasilios and M.I. Nikolaos, "A novel SVPWM overmodulation technique based on voltage correcting function", in proc. *2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, June 25-28, 2012, Aalborg, Denmark, pp. 682-689. DOI: 10.1109/PEDG.2012.6254076

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Попов Александр Александрович, инженер Национального исследовательского Мордовского государственного университета, г. Саранск, Российская Федерация.

Онищенко Георгий Борисович, доктор технических наук, профессор, научный руководитель ООО «Научно-технический центр Приводная Техника», г. Москва, Российская Федерация.

Гуляев Игорь Васильевич, доктор технических наук, профессор, руководитель НОЦ Национального исследовательского Мордовского государственного университета, г. Саранск, Российская Федерация.

Alexander A. Popov, engineer of the National Research Mordovia State University, Saransk, Russian Federation.

Georgiy B. Onishchenko, D. Sci. (Eng.), professor, scientific supervisor of the LLC "Scientific and Technical Center Drive Technology", Moscow, Russian Federation.

Igor V. Gulyaev, D. Sci. (Eng.), professor, head of science and research center of the National Research Mordovia State University, Saransk, Russian Federation.