

Электротехнические комплексы и системы

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.4.027.4:656.2

doi: 10.30987/2658-6436-2023-3-89-96

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ «СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР – ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ – СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ»

Николай Валентинович Чуприна^{1✉}, Александр Анатольевич Пугачев²

^{1,2}Брянский государственный технический университет; Брянск, Брянская область, Россия

¹nikochuprina212@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8915-0926>

²alexander-pugachev@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1836-0923>

Аннотация. Показана актуальность применения систем электрической передачи мощности переменного тока на транспортных средствах, включая автономные локомотивы, использующих в своем составе синхронные генераторы и тяговые синхронные двигатели. Приведены типовая структурная схема электрической передачи, применяемая на тяговом подвижном составе, и функциональная схема электрической передачи с синхронным генератором и тяговыми двигателями. На основании теории обобщенной электрической машины разработано математическое описание в двухфазной системе координат для синхронного генератора с обмоткой возбуждения и пусковой обмоткой и синхронного двигателя с постоянными магнитами, показаны их эквивалентные схемы замещения. Приведены результаты моделирования в Matlab Simulink электрической системы с двумя тяговыми двигателями, подключенными к преобразователям частоты с двухуровневыми автономными инверторами напряжения, для управления двигателями применена система прямого управления моментом с табличной функцией переключения автономного инвертора по выходным сигналам релейных регуляторов момента и потокосцепления. На основании полученных результатов даны рекомендации по синтезу энергоэффективных систем управления синхронными двигателями с постоянными магнитами.

Ключевые слова: синхронный генератор, обмотка возбуждения, пусковая обмотка, синхронный двигатель, постоянные магниты, автономный инвертор напряжения, прямое управление моментом, моделирование

Для цитирования: Чуприна Н.В., Пугачев А.А. Моделирование системы «синхронный генератор – преобразователь частоты – синхронный двигатель» // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2023. №3 (21). с. 89-96. doi: 10.30987/2658-6436-2023-3-89-96.

Original article

Open Access Article

SIMULATION OF «SYNCHRONOUS GENERATOR – FREQUENCY CONVERTER – SYNCHRONOUS MOTOR» SYSTEM

Nikolay V. Chuprina^{1✉}, Alexander A. Pugachev²

^{1,2}Bryansk State Technical University; Bryansk, Russian Federation

¹nikochuprina212@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8915-0926>

²alexander-pugachev@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1836-0923>

Abstract. The relevance of the use of AC-AC power transmission systems on vehicles, including autonomous locomotives, using synchronous generators and traction synchronous motors is showed. Typical block diagram of electric transmission of traction rolling stock and functional diagram of electric power transmission with synchronous generator and traction motors are given. Based on the theory of a generalized electrical motor, a mathematical description has

been developed in a two-phase coordinate system for a synchronous generator with excitation winding and starting winding and a synchronous motor with permanent magnets, its equivalent schemes are shown. The results of simulation in Matlab Simulink of electric system with two traction motors connected to frequency converters with two-level voltage source inverters are given. Direct torque control system with a table function of switching the voltage source inverter by output signals of relay regulators of torque and flux linkage is used for motor control. Based on the obtained results, recommendations for the synthesis of energy-efficient control systems for synchronous motors with permanent magnets are given.

Key words: synchronous generator, excitation winding, starting winding, synchronous motor, permanent magnets, voltage source inverter, direct torque control, simulation

For citation: Chuprina N.V., Pugachev A.A. Simulation of «synchronous generator – frequency converter – synchronous motor» system. Automation and modeling in design and management, 2023, no. 3 (21). pp. 89-96. doi: 10.30987/2658-6436-2023-3-89-96.

Введение

Наибольшее распространение на железных дорогах получили локомотивы, приводящиеся в движение электрическими двигателями. Типовая структурная схема электропередачи локомотива представлена на рис. 1. На рис. 1 и далее приняты обозначения: ИЭЭ – источник электрической энергии, ЭПР – электрический преобразователь, ЭМП – электромеханический преобразователь, МП – механический преобразователь, ИУ – измерительные устройства, СУ – система управления, БТР – блок тормозных резисторов, КП – колесная пара.

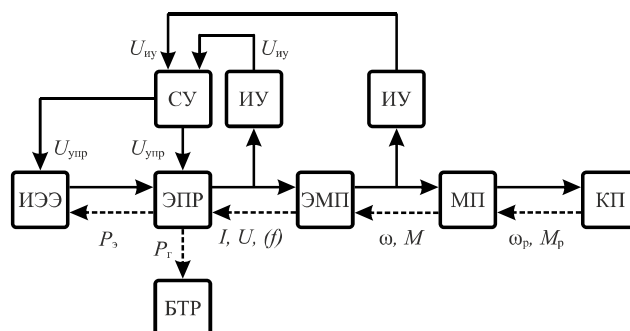


Рис. 1. Типовая структурная схема электропередачи тягового подвижного состава
Fig. 1. Typical block diagram of electric transmission of traction rolling stock

Для автономного подвижного состава ИЭЭ P_3 является генератор, приводимый во вращение двигателем внутреннего сгорания, а для неавтономных локомотивов – контактная сеть. В качестве генераторов используются генераторы постоянного тока, трехфазные или шести-фазные синхронные электромашин с обмоткой возбуждения. Основной задачей ЭПР является преобразование электрической энергии с требуемыми параметрами тока, напряжения и частоты $I, U, (f)$. В качестве ЭПР на подвижной составе используются тиристорные регуляторы напряжения (для локомотивов с электрической передачей переменного-постоянного тока, постоянно-постоянного тока), автономные инверторы напряжения (для локомотивов с электрической передачей переменного-переменного тока, постоянно-переменного тока) широтно-импульсные преобразователи, четырехквadrантные преобразователи (в любых видах электрических передач). ЭМП преобразует электрическую энергию в механическую (ω – частота вращения, M – момент), на тяговом подвижном составе используются двигатели постоянного и переменного тока (асинхронные, синхронные, вентильные двигатели).

Проблеме исследования электропередачи локомотивов в целом и ее отдельных функциональных узлов посвящен ряд работ [1,2,3,4]. Для тепловозов наибольший интерес представляют электрические передачи переменного-переменного тока, так как они позволяют получать наилучшие тяговые характеристики локомотива и обладают более высокими в сравнении с передачами переменного-постоянного тока энергетическими показателями.

Наиболее перспективной является передача переменного-переменного тока (например, на тепловозе 2ТЭ25А в качестве ИЭЭ применен синхронный генератор с обмоткой возбуждения (СГОВ), в качестве ЭМП – асинхронный двигателя (АД)). В настоящее время проявляется все

большой интерес к использованию в качестве ЭМП синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ). СДПМ уже применяются на таких электропоездах как *TGV* и *AGV (Alstom Transport)*, маневровых тепловозах *HD300 (Japan Freight Railway)*. Применение СДПМ позволяет повысить КПД электрической передачи, упростить компоновку и уменьшить массу экипажной части локомотива [5,6,7,8].

В данной статье разработана математическая модель системы «СГОВ – преобразователь частоты с автономным инвертором напряжения – СДПМ», пригодной для применения в электрической передаче переменного-переменного тока.

Математическое описание силового канала системы «СГОВ – преобразователь частоты – СДПМ»

Упрощенная схема силовой части СГОВ и СДПМ в составе электропередачи приведена на рис. 2. Источником механической мощности на валу СГОВ $P_{\text{мех}}$ является двигатель внутреннего сгорания, источником постоянного напряжения на обмотке возбуждения $U_{\text{ов}}$ – аккумуляторная батарея. В качестве звена постоянного тока ЗПТ используется батарея конденсаторов, БТР коммутируется полупроводниковым ключом, автономный инвертор напряжения (АИН) реализован на полупроводниковых ключах с двухсторонней проводимостью. Количество преобразователей с СДПМ, подключенных параллельно к обмотке СГОВ, зависит от типа, мощности и схемы экипажной части транспортного средства.

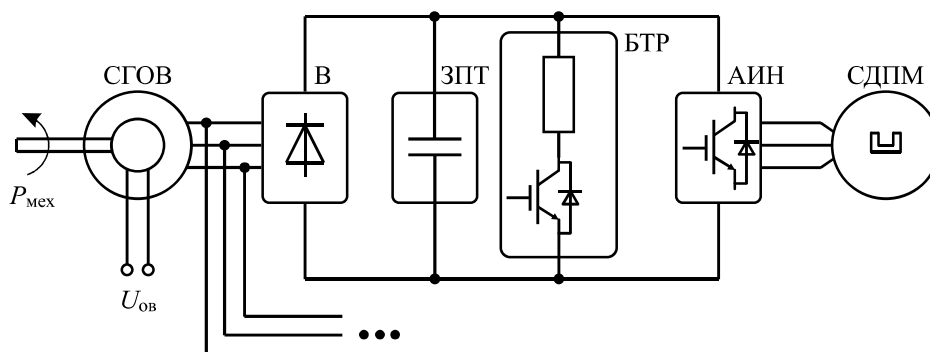


Рис. 2. Функциональная схема системы «СГОВ – преобразователь частоты – СДПМ»
Fig. 2. Functional diagram of «SG with EW – frequency converter - PMSM» system

Синтез математической модели синхронных электромашин произведем в ортогональной системе координат dq , вращающейся синхронно с ротором электромашин. Преимущества этой системы координат и особенности описания процессов в ней приведены в [9,10]. На базе обобщенного электромеханического преобразователя на рис. 3 представлено расположение обмоток статора и ротора СГОВ с пусковой обмоткой и СДПМ в системе координат dq .

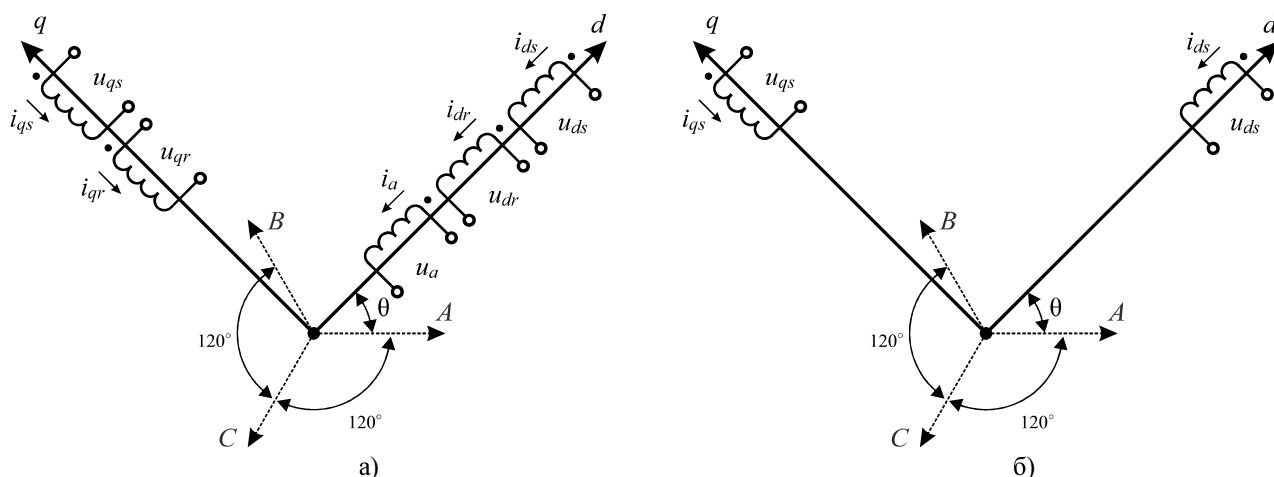


Рис. 3. Расположение обмоток статора и ротора СГОВ с пусковой обмоткой (а) и СДПМ (б)
Fig. 3. Arrangement of stator and rotor windings SG with EW and starting winding (a) and PMSM (b)

Эквивалентная схема замещения СГОВ с пусковой обмоткой, соответствующая расположению обмоток (рис. 3а) представлена на рис. 4.

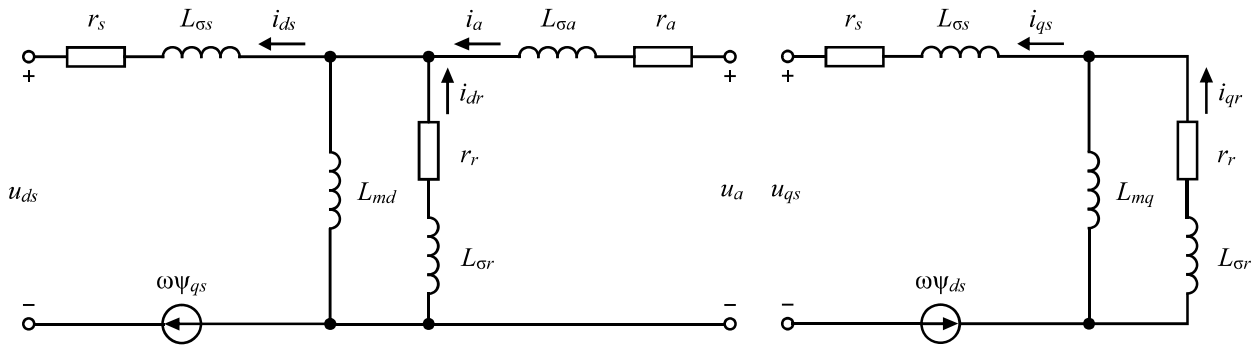


Рис. 4. Схема замещения синхронного генератора с обмоткой возбуждения и пусковой обмоткой
Fig. 4. Equivalent circuit of a synchronous generator with an excitation winding and a starting winding

Уравнения напряжений статора, пусковой обмотки и обмотки возбуждения СГОВ представлены ниже:

$$u_{ds} = -i_{ds}r_s + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_r\psi_{qs}, \quad (1)$$

$$u_{qs} = -i_{qs}r_s + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_r\psi_{ds}, \quad (2)$$

$$0 = \frac{d\psi_{dr}}{dt} + i_{dr}r_r, \quad (3)$$

$$0 = \frac{d\psi_{qr}}{dt} + i_{qr}r_r, \quad (4)$$

$$u_a = \frac{d\psi_a}{dt} + i_a r_a, \quad (5)$$

где u_{ds} и u_{qs} – напряжения статора; u_a – напряжение обмотки возбуждения; ψ_{ds} и ψ_{qs} – потокосцепления статора; ψ_{dr} и ψ_{qr} – потокосцепления пусковой обмотки, ψ_a – потокосцепление обмотки возбуждения; i_{ds} и i_{qs} – токи статора; i_{dr} и i_{qr} – токи статора; i_a – ток обмотки возбуждения; r_s – сопротивление статора; r_r – сопротивление пусковой обмотки; r_a – сопротивление пусковой обмотки.

Потокосцепления в уравнениях (1) – (5) выражаются так:

$$\psi_{ds} = i_{dr}L_{md} + i_a L_{md} - i_{ds}(L_{md} + L_{\sigma s}), \quad (6)$$

$$\psi_{qs} = i_{qr}L_{mq} - i_{qs}(L_{mq} + L_{\sigma s}), \quad (7)$$

$$\psi_{dr} = i_a L_{md} + (L_{\sigma r} + L_{md})i_{dr} - i_{ds}L_{md}, \quad (8)$$

$$\psi_{qr} = (L_{mq} + L_{\sigma r})i_{qr} - i_{qs}L_{mq}, \quad (9)$$

$$\psi_a = (L_{md} + L_{\sigma a})i_a + i_{dr}L_{mq} - i_{ds}L_{md}, \quad (10)$$

где L_{md} и L_{mq} – индуктивности статора; $L_{\sigma s}$ – индуктивность рассеяния статора; $L_{\sigma r}$ – индуктивность рассеяния пусковой обмотки; L_a – индуктивность рассеяния пусковой обмотки.

Эквивалентная схема замещения СДПМ, соответствующая расположению обмоток (рис. 3б) представлена на рис. 5.

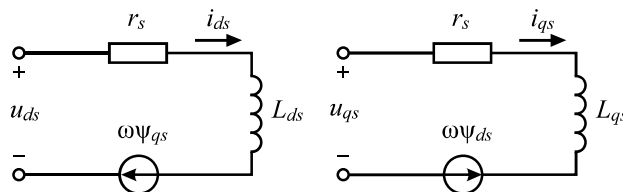


Рис. 5. Схема замещения синхронного двигателя с постоянными магнитами
Fig. 5. Equivalent circuit of a permanent magnet synchronous motor

Уравнения напряжений статора СДПМ представлены ниже:

$$u_{ds} = i_{ds}r_s + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega\psi_{qs}, \quad (11)$$

$$u_{qs} = i_{qs}r_s + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega\psi_{ds}. \quad (12)$$

С учетом расположения постоянных магнитов ротора вдоль оси d потокосцепления в уравнениях (11) и (12) выражаются так:

$$\psi_{ds} = i_{ds}L_{ds} + \psi_f, \quad (13)$$

$$\psi_{qs} = i_{qs}L_{qs}, \quad (14)$$

где ψ_f – потокосцепление постоянных магнитов.

Электромагнитный момент СДПМ можно вычислить следующим образом:

$$M = \frac{3}{2}N(\psi_f i_{qs} - (L_{qs} - L_{ds})i_{ds}i_{qs}). \quad (15)$$

где N – число пар полюсов.

Таким образом, выражения (1) – (15) описывают преобразования энергии в синхронных электромашинах. Отметим, что из-за меньшего числа обмоток математическое описание СДПМ получается проще, чем СГОВ. Вместе с этим, для обеспечения нормального функционирования СДПМ во всех режимах работы, включая пуск и торможение, его обмотку статора необходимо подключить к управляемому преобразователю частоты, который осуществляет плавное формирование всех переходных процессов по каналу управления и регулирование частоты вращения и момента с заданными показателями качества. Для регулирования механических характеристик СДПМ применена система прямого управления моментом, содержащая релейные регуляторы момента и потокосцепления, причем контур момента является подчиненным контуру частоты вращения, в котором применен ПИ-регулятор. Задание на потокосцепление является постоянным и равным номинальному. Математическая модель системы прямого управления моментом подробно описана в [10,11]. В данной работе рассмотрено применение классической структуры преобразователя частоты с выпрямителем, звеном постоянного тока и двухуровневым автономным инвертором напряжения. Система управления инвертором напряжения является подчиненной системе прямого управления моментом СДПМ и коммутирует силовые ключи в функции выходных сигналов релейных регуляторов.

Результаты моделирования и их обсуждение

Моделирование было проведено в системе *Matlab Simulink*, метод моделирования – метод Рунге-Кутты 4-го порядка, шаг моделирования – 0,1 мкс.

При моделировании был использован СДПМ со следующими параметрами: $P = 39,5$ кВт, $\omega = 314$ рад/с, $N = 4$, напряжение звена постоянного тока $U_{dc} = 560$ В, $r_s = 0,05$ Ом, $L_d = 0,000635$ Гн, $L_q = 0,000635$ Гн, $\psi_f = 0,192$ Вб, суммарный момент инерции механической части электропривода $J = 0,05$ кг·м². Количество СДПМ – 2. Параметры СГОВ: $P = 85$ кВА, $\omega = 157$ рад/с, $N = 2$, $u_a = 70$ В, $r_s = 0,055$ Ом, $L_{\sigma s} = 0,0003595$ Гн, $L_{md} = 0,01282$ Гн, $L_{mq} = 0,005692$ Гн, $r_r = 0,3121$ Ом, $L_{\sigma r} = 0,002465$ Гн, момент инерции генератора $J_f = 0,7$ кг·м². Ширина петли гистерезиса реле момента – 0,126 Нм, потокосцепления – 0,1 мВб.

Для примера на рис. 6 представлены результаты математического моделирования СДПМ при изменяющемся моменте сопротивления (момент сопротивления $M_c = 0,25 M_{ном}$ при $t = 0,15$ с; $M_c = 0,5 M_{ном}$ при $t = 0,2$ с; $M_c = 0,75 M_{ном}$ при $t = 0,25$ с; $M_c = M_{ном}$ при $t = 0,3$ с).

Результаты моделирования показали адекватность разработанных моделей. Электропривод с СДПМ обрабатывает задание на частоту вращения без статической ошибки по возмущению, что объясняется повышением астатизма контура регулирования за счет введения интегральной составляющей в состав регулятора. Ток i_q при выбранной ориентации осей dq является моментобразующим и его величина, аналогично току якоря машин постоянного тока, определяет значение момента на валу двигателя. Потенциал энергосбережения в работе СДПМ проявляется в возможности уменьшения второй проекции тока i_d , как видно из графика

(рис. 6б) для двигателей с магнитной симметрией в номинальном режиме работы $i_d = 0$. Очевидно, что систему энергоэффективного управления СДПМ целесообразно синтезировать на принципе определения (или поиска) и поддержания минимального (или нулевого) значения этого тока. Отметим, что для СДПМ применение систем энергоэффективного управления с регулированием потокосцепления статора должно дать большую выгоду по сравнению с применением аналогичных систем для асинхронных двигателей за счет отсутствия переменных потерь в обмотках ротора. Форма тока статора (рис. 6в), близкая к синусоидальной, и годографа потокосцепления (рис. 6г), близкая к идеальной окружности, объясняется низкими значениями гистерезиса релейных регуляторов и малым значением шага моделирования.

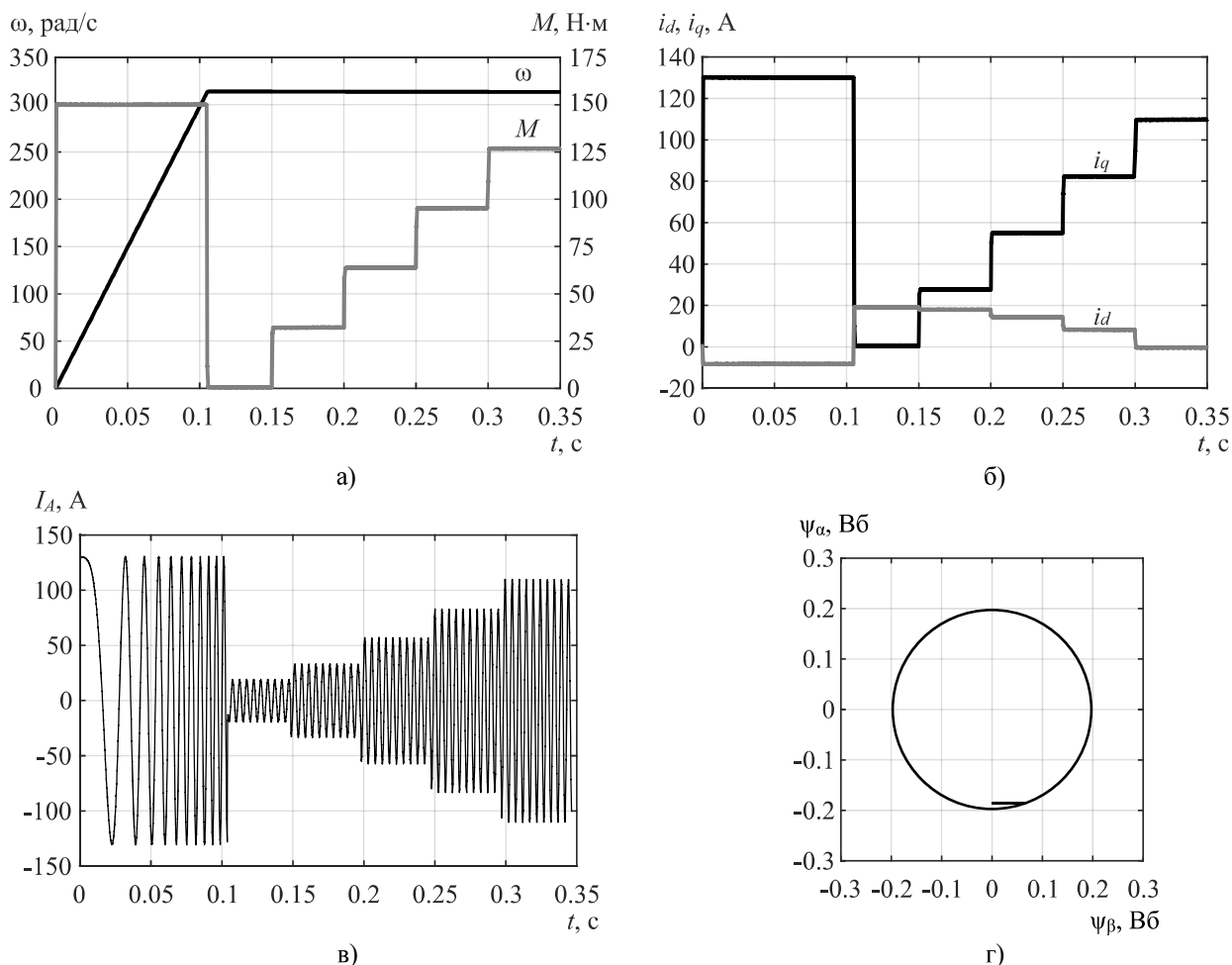


Рис. 6. Зависимости частоты вращения и момента (а), токов статора в системе координат dq (б), тока фазы А статора (в) от времени и годограф потокосцепления статора (г)
Fig. 6. Time dependences of rotor speed and torque, stator currents in the dq coordinate system, stator current of the phase A and hodograph of the stator flux linkage

Заключение

В статье разработано математическое описание системы «СГОВ – преобразователь частоты с двухуровневым автономным инвертором напряжения – СДПМ», пригодной для применения в электрической передаче переменного-переменного тока. Для управления синхронным двигателем использована система прямого управления моментом. Система прямого управления моментом формирует управляющие импульсы по табличной функции в зависимости от знаков ошибок контуров регулирования момента и потокосцепления. Результаты моделирования показали работоспособность разработанных моделей генератора и двигателя как в установившихся, так и в переходных режимах работы. Анализ результатов моделирования позволяет определить перспективные направления дальнейших исследований в области систем

управления СДПМ, применение которых обеспечит регулирование выходных координат электропривода с улучшенными энергетическими характеристиками.

Список источников:

1. Журавлев С. Н., Пудовиков О. Е. Система автоматического управления скоростью маневрового тепловоза в режиме горочной работы // Бюллетень результатов научных исследований. – 2023. – Вып. 2. – С. 181–194. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-181-194
2. Бурков А. Т., Валинский О. С., Евстафьев А. М. [и др.] Системы управления тяговым приводом современных локомотивов // Электротехника. – 2019. – № 10. – С. 33–36. – EDN TGLTIM.
3. Hill R. J. Traction drives and inverters // Railway Electrification Infrastructure and Systems. 2007. Pp. 185–196. doi: 10.1049/IC.2007.165
4. Пудовиков О. Е., Сидоренко В. Г., Сидорова Н. Н., Киселев М. Д. Система автоматического управления скоростью грузового поезда с распределенной тягой // Электротехника. – 2019. – № 9. – С. 47–55. – EDN JBMENY.
5. Колпахчян П.Г., Подберезная М.С., Шайхив А.Р. Особенности управления синхронными тяговыми двигателями с постоянными магнитами на роторе на электроподвижном составе // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2018. № 2 (70). С. 132 – 137.
6. Apte A., Walambe R., Joshi V., Rathod K., Kolhe J. Simulation of a permanent magnet synchronous motor using Matlab-Simulink. Annual IEEE India Conference (INDICON). 2014. Pp. 1-5. doi: 10.1109/INDICON.2014.7030469
7. Yang Y., Castano S., Yang R., Kasprzak M., Bilgin B., Sathyan A., et al. Comparison of Interior Permanent Magnet Motor Topologies for Traction Applications. IEEE Trans. Topologies for Traction Applications. 2017. Vol. 3 (1). Pp. 86–97. doi: 10.1109/TTE.2016.2614972
8. Nagamani, C., Somanatham, R. Design and Analysis of Traction Drive System for Hybrid Locomotives using 5-phase Permanent Magnet Synchronous Motors as Traction Motors. Journal on Electrical Engineering. 2016. Vol. 10 (2). Pp. 27–45. <https://doi.org/10.26634/jee.10.2.8324>
9. Чуприна Н.В., Пугачев А.А. Моделирование системы векторного управления тяговым синхронным двигателем с постоянными магнитами // Электротехнические системы и комплексы. 2022. №2 (55). С. 10–17. DOI: 10.18503/2311-8318-2022-2(55)-10-17.
10. Чуприна Н.В., Пугачев А.А. Система прямого управления моментом тягового синхронного двигателя с постоянными магнитами с минимизацией потерь мощности // Интеллектуальная Электротехника. 2022. №4. С. 22–37. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_4_22.
11. Космодамианский, А. С., Воробьев В. И., Пугачев А. А. Прямое управление моментом асинхронных двигателей при их питании от одного преобразователя частоты // Электротехника. – 2015. – № 9. – С. 29–35. – EDN UGJOPF.

References:

1. Zhuravlev S. N., Pudovikov O. E. Automatic Speed Control System of a Hump-Shunting Diesel Locomotive. Bulletin of scientific research results, 2023, iss. 2, pp. 181–194. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-181-194
2. Burkov, A.T., Valinsky, O.S., Evstaf'ev, A.M. et al. Modern Locomotive Traction Drive Control Systems. Russ. Electr. Engin. 90, 692–695 (2019). <https://doi.org/10.3103/S106837121910002X>.
3. Hill R. J. Traction drives and inverters. Railway Electrification Infrastructure and Systems. 2007. Pp. 185–196. doi: 10.1049/IC.2007.165
4. Pudovikov, O.E., Sidorenko, V.G., Sidorova, N.N. et al. Systems for Automatic Control of Locomotive Speed of a Freight Train with Distributed Traction. Russ. Electr. Engin. 90, 653–660 (2019). <https://doi.org/10.3103/S1068371219090086>
5. Kolpahch'yan P.G., Podberesnaya M.S., SHajhiev A.R. Features of control of synchronous traction motors with permanent magnets on the rotor on electric rolling stock. Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya [Bulletin of the Rostov State University of Communications]. 2018. No 2 (70). P. 132 – 137. (In Russian)
6. Apte A., Walambe R., Joshi V., Rathod K., Kolhe J. Simulation of a permanent magnet synchronous motor using Matlab-Simulink. Annual IEEE India Conference (INDICON). 2014. Pp. 1-5. doi: 10.1109/INDICON.2014.7030469
7. Yang Y., Castano S., Yang R., Kasprzak M., Bilgin B., Sathyan A., et al. Comparison of Interior Permanent Magnet Motor Topologies for Traction Applications. IEEE Trans. Topologies for Traction Applications. 2017. Vol. 3 (1). Pp. 86–97. doi: 10.1109/TTE.2016.2614972
8. Nagamani, C., Somanatham, R. Design and Analysis of Traction Drive System for Hybrid Locomotives using 5-phase Permanent Magnet Synchronous Motors as Traction Motors. Journal on Electrical Engineering. 2016. Vol. 10 (2). Pp. 27–45. <https://doi.org/10.26634/jee.10.2.8324>
9. Chuprina N.V., Pugachev A.A. Simulation of Traction Permanent Magnet Synchronous Motor Vector Control System in Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no 2(55), pp. 10–17 (in Russian). DOI: 10.18503/2311-8318-2022-2(55)-10-17.
10. Chuprina N.V., Pugachev A.A. Traction permanent magnet synchronous motor direct torque control system with power losses minimization, Smart Electrical Engineering, no. 4, pp. 22–37, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_4_22
11. Kosmodamianskii A.S., Vorobiev V.I., Pugachev A.A. Direct torque control of induction motors fed by a single frequency converter (2015) Russian Electrical Engineering, 86, pp. 527 – 533. DOI: 10.3103/S1068371215090060

Информация об авторах:

Чуприна Николай Валентинович

Аспирант, ассистент кафедры «Промышленная электроника и электротехника» Брянского государственного технического университета

Пугачев Александр Анатольевич

Доктор технических наук, заведующий кафедрой «Промышленная электроника и электротехника» Брянского государственного технического университета

Information about the authors:

Chuprina Nikolay Valentinovich

Postgraduate Student, Assistant of the Department of Industrial Electronics and Electrical Engineering of Bryansk State Technical University

Pugachev Alexander Anatolievich

Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Industrial Electronics and Electrical Engineering of Bryansk State Technical University

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.**

Статья поступила в редакцию 21.08.2023; одобрена после рецензирования 07.09.2023; принята к публикации 11.09.2023.

The article was submitted 21.08.2023; approved after reviewing 07.09.2023; accepted for publication 11.09.2023.

Рецензент – Пудовиков О.Е., доктор технических наук, доцент, Российский университет транспорта.

Reviewer – Pudovikov O.E., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Russian University of Transport.

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: (4832) 56-49-90. E-mail: aim-ru@mail.ru

Вёрстка А.Г. Малаханова. Редактор Д.А. Петраченко.

Сдано в набор 15.09.2023. Выход в свет 29.09.2023.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 11,16.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет»

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

