Научная статья
УДК 62-83
DOI: 10.14529/power220406

# ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

***Д.Ю. Хрюкин**, khriukindi@susu.ru, https://orcid.org/0000-0001-7854-4989*
***Е.М. Тулегенов**, erlan.tulegenov2017@yandex.ru*
***К.Д. Семенова**, volbergskd@gmail.com*
***В.А. Кушнарев**, a55538a@yandex.ru*
***Д.А. Сычев**, sychevda@susu.ru*
*Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия*

***Аннотация.*** В статье рассматриваются проблемы оптимизации при проектировании комплекта электропривода переменного тока мощностью до 1 МВт. Необходимость оптимизации при проектировании электроприводов обусловлена технико-экономическими показателями при долгосрочной эксплуатации электропривода. Основной проблемой оптимизации электроприводов переменного тока является сложность математического описания электродвигатель-преобразователь частоты. Представлена обобщенная математическая модель электроприводов переменного тока, в которой нелинейная часть преобразователя частоты представлена апериодическим звеном с постоянной времени $T_i$, звеном чистого запаздывания с постоянной времени $\tau$ и переключающей функцией $\Psi_{ni}$, которые являются аппроксимирующими для передаточной функции полупроводникового преобразователя. Такая математическая модель позволяет синтезировать силовые цепи и систему управления *i*-фазного преобразователя. Оптимизация электромеханического преобразователя рассмотрена с применением метода конечных элементов.

***Ключевые слова:*** метод конечных элементов, электропривод переменного тока, математическая модель электропривода, синхронный реактивный двигатель

***Благодарности:*** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20145, https://rscf.ru/project/22-29-20145/.

***Для цитирования:*** Оптимизация электроприводов переменного тока промышленных механизмов / Д.Ю. Хрюкин, Е.М. Тулегенов, К.Д. Семенова и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2022. Т. 22, № 4. С. 53–59. DOI: 10.14529/power220406

Original article
DOI: 10.14529/power220406

# OPTIMIZATION OF ELECTRIC DRIVES OF INDUSTRIAL MECHANISMS

***D.Yu. Khriukin**, khriukindi@susu.ru, https://orcid.org/0000-0001-7854-4989*
***E.M. Tulegenov**, erlan.tulegenov2017@yandex.ru*
***K.D. Semenova**, volbergskd@gmail.com*
***V.A. Kushnarev**, a55538a@yandex.ru*
***D.A. Sychev**, sychevda@susu.ru*
*South Ural State University, Chelyabinsk, Russia*

***Abstract.*** This article discusses optimization problems in the design of an AC electric drive kit with a capacity of up to 1 MW. The need for optimization in the design of the electric drive is due to the technical and economic indicators of the long-term operation of the electric drive. The main problem of optimizing the AC electric drive is the complexity of the mathematical description of the frequency converter electric motor. A generalized mathematical model of AC electric drives is presented, in which the nonlinear part of the frequency converter is represented by an aperiodic link with a time constant $T_i$, a pure delay link with a time constant $\tau$ and a switching function $\Psi_{ni}$, which are approximating a semiconductor converter for the transfer function. Such a mathematical model makes it possible to synthesize power

© Хрюкин Д.Ю., Тулегенов Е.М., Семенова К.Д., Кушнарев В.А., Сычев Д.А., 2022

circuits and an *i*-beam converter control system. The optimization of an electromechanical converter using the finite element method is considered.

***Keywords:*** finite element method, current circuit electric drive, electric drive mathematical model, synchronous reluctance motor

***Acknowledgments:*** The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-29-20145, https://rscf.ru/project/22-29-20145/.

***For citation:*** Khriukin D.Yu., Tulegenov E.M., Semenova K.D., Kushnarev V.A., Sychev D.A. Optimization of electric drives of industrial mechanisms. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering.* 2022;22(4): 53–59. (In Russ.) DOI: 10.14529/power220406

**Введение**

Повышение энергоэффективности и надежности электротехнического оборудования, а конкретно комплекса электромеханического и электрического преобразователей, считается вопросом решенным. Анализ работ отечественных и зарубежных авторов, а также результаты научно-технической деятельности электротехнических компаний показали, что наиболее частым является решение, при котором задачи улучшения качественных характеристик электропривода выполняются путем оптимизации современных систем электроприводов переменного с питанием от трехфазных источников с синусоидальной формой тока. Такие научно-технические решения повсеместно внедрены в отечественной и западной промышленности на всех ответственных технологических механизмах. Альтернативное решение повышения качества характеристик работы электропривода – разработка и проектирование специальных электромеханических преобразователей для приводов относительно небольшой мощности (до 1 МВт), однако здесь проблема оптимизации решается только с позиции электромеханического преобразователя без учета теории и принципов построения новых структуры импульсных источников энергии. Существуют многочисленные работы российских и зарубежных ученых, посвященные исследованиям общей теории электромеханического преобразования энергии, а также теории вентильных полупроводниковых преобразователей частоты. В рамках поставленной задачи многовекторной оптимизации комплекта регулируемого электропривода необходимо акцентировать внимание на трех ключевых аспектах современных исследований в области основ теории современных регулируемых электроприводов переменного тока.

Начиная с конца 1970-х гг. началось создание основ теории электрических машин нетрадиционных конструкций, таких как шаговые электродвигатели, вентильно-индукторные, реактивные и другие [1, 2]. Однако целенаправленных работ вплоть до начала 2000-х гг. не проводилось по причине слаборазвитой полупроводниковой техники. Вопрос оставался открытым на концептуальном уровне (синергетической парадигмы о возможности достижения улучшенных массогабаритных показателей с существенно улучшенными показателями, которые могли быть достигнуты при отказе от синусоидальных законов управления, выбора другого числа фаз). В последние годы интерес к теории этих электромеханических преобразователей восстановился. Показано, что улучшение энергетических показателей возможно за счет изменения законов управления переменными электромеханического преобразователя [3, 4].

В то же время в части работ обращается внимание на возможность улучшения удельных показателей электромеханических преобразователей за счет выбора наилучших геометрических параметров электрических машин. Установлено, что наилучшие показатели в электромеханических преобразователях могут быть достигнуты только как при оптимизации геометрических параметров электродвигателя, так и за счет выбора оптимальных законов управления [5, 6].

Оптимизацией конфигурации полупроводниковых преобразователей начали заниматься с самого начала их появления, основные публикации по оптимизации преобразователей частоты приходятся лишь на последние 20 лет [7]. Однако при создании общей теории полупроводниковых преобразователей частоты редко используются статистические данные, которые можно получить на реальных объектах, для уточнения реальных энергетических показателей преобразователей частоты.

Третий аспект, на который будет обращено внимание в данной работе, связан с созданием математических моделей с параллельными расчетами на суперкомпьютерных кластерах. На сегодня можно назвать ряд удачных работ, в которых решена задача устойчивого распараллеливания расчетов по критериям устойчивого расчета и минимума расчетного времени. Однако практически нет информации о возможности распараллеливания расчетов, в которых одновременно используются метод конечных элементов для решения дифференциальных уравнений систем с распределенными параметрами и расчет переходных процессов численными методами обычных дифференциальных уравнений. Практически неизвестны работы, в которых проводилось бы совокупное рассмотрение общей теории электромеханического преобразования энергии в теории вентильных преобразователей частоты, которая позволит в комплексе выполнить оптимизационные процедуры.

**Обобщенная математическая модель электроприводов переменного тока**

Исследования влияния изменения геометрических параметров с целью улучшения характеристик регулируемого электропривода переменного тока невозможно проводить без детализированного описания электромагнитных процессов в его системе. Как правило, для машин традиционных конструкций (асинхронные электроприводы, синхронные электроприводы с неявнополюсным ротором) математическое описание этих процессов обычно ограничивается кривой намагничивания. Кривая намагничивания приемлема для описания электромагнитных процессов классического электродвигателя в рабочем диапазоне, при выходе привода за рабочий диапазон возникает перераспределение магнитных полей. В режимах перегрузки отсутствие учета характера перераспределения магнитных полей приводит к существенным расхождениям расчетных и экспериментальных кривых не только в динамике, но и в установившихся режимах работы [8]. Таким образом, для классических электромеханических преобразователей, работающих в режимах перегрузки, а также для электромеханических преобразователей нестандартной конструкции необходим обязательный учет распределённого характера параметров магнитной системы, что невозможно без знания подробной картины распределения магнитного поля в активных частях электромеханического преобразователя.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что задача синтеза обобщённой модели комплекта электропривода (электромеханического преобразователя и полупроводникового преобразователя) переменного тока, учитывающая распределенный характер магнитной системы, является актуальной.

Большинство математических моделей, описывающих состояние системы электропривода, выполняются с сосредоточенными параметрами. Авторами этих моделей зачастую не рассматривается допустимость принимаемых упрощений в полной мере.

Ранее была предложена обобщённая математическая модель электропривода переменного тока, электромеханический преобразователь которой имеет произвольную конструкцию магнитной цепи [8]. Здесь параметры полупроводникового преобразователя аппроксимированы непрерывными динамическими звеньями в диапазоне частот от $0{,}5\omega_0$ до $\omega_0$. Параметры электромеханического преобразователя являются распределёнными. Построение математического описания основывается на критерии минимума расчетного времени, а алгоритм параллельного вычисления обобщен для электроприводов переменного тока. Модель построена с учетом особенностей распределения магнитного потока в электромеханическом преобразователе при упрощенном подходе к описанию полупроводникового преобразователя. Обобщенная математическая модель (рис. 1) выполнена в виде структурной схемы для удобства сопостав-

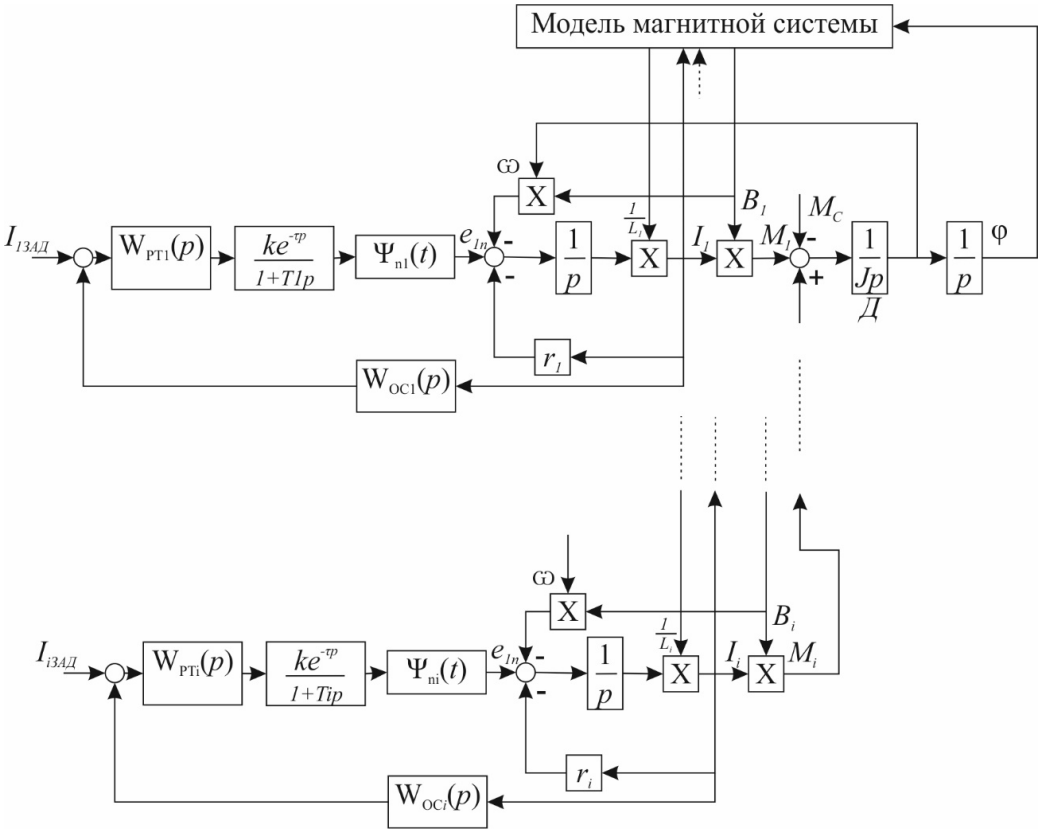



**Рис. 1. Обобщенная модель электропривода переменного тока**
**Fig. 1. Generalizedmodel of electric current drive**

ления возможностей электроприводов переменного тока различных типов и состоит из двух блоков.

Система дифференциальных уравнений в полных производных, которая описывает уравнения баланса напряжения в обмотках статора, а также уравнения Лагранжа для вращающихся тел, реализована в первом блоке. Параметры системы $L_1, L_2, \ldots, L_i$ являются выходными для блока «Модель магнитной системы двигателя», обозначение которых является индуктивностями обмоток для математического описания электрической машины с сосредоточенными параметрами. В действительности значения этих параметров зависят от текущего электромагнитного состояния системы [8].

Апериодическое звено с постоянной времени $T_i$, звено чистого запаздывания с постоянной времени τ и переключающая функция $\Psi_{ni}$ являются аппроксимирующими для передаточной функции полупроводникового преобразователя.

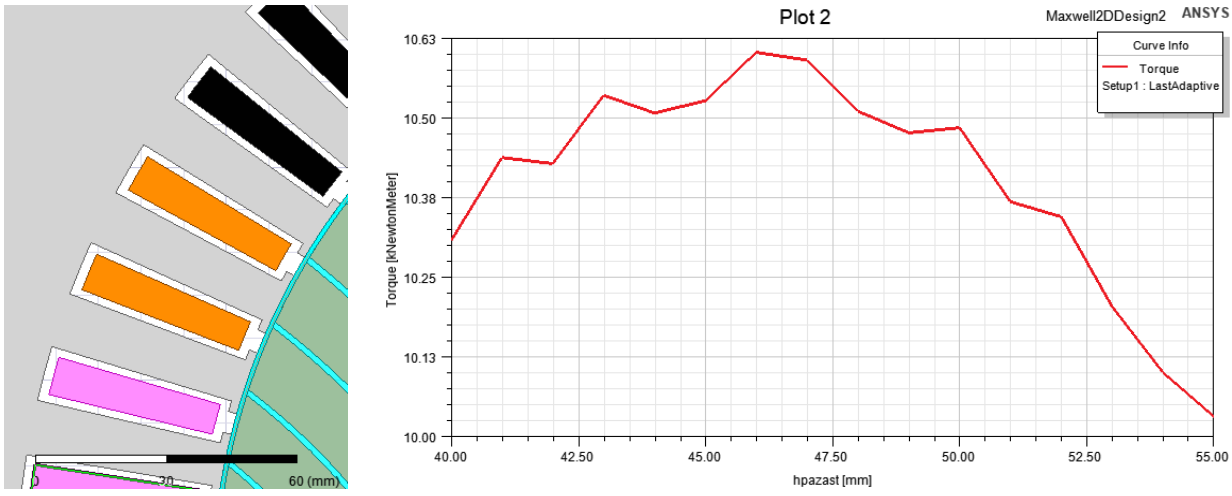
В общем случае регулируемый электропривод переменного тока может быть представлен $i$-фазной системой. Обычно электроприводы переменного тока выполняются на базе 3-фазных систем, однако электроприводы большой мощности и реактивные синхронные электроприводы могут иметь конфигурацию от пяти и более фаз. Последовательное корректирующее устройство $W_{PTi}(p)$ также необходимо для настройки контуров регулирования фазных токов, где на вход системы подаются задания на $i$ токов. Питание электромеханического преобразователя в рассматриваемой модели принято от источников тока, при разомкнутых конторах регулирования фазных токов схема питания преобразуется в преобразователь ЭДС [9, 10].

**Пространственная математическая модель электромеханического преобразователя**

Необходимо отметить важность алгоритмов оптимизации геометрии электрических двигателей на этапе проектирования. Это позволяет подобрать оптимальное отношение размеров ширины, длины и глубины пазов статора, подобрать лучшее конструктивное решение формы ротора в зависимости от выбираемого параметра: электромагнитного момента, скорости, тока. В программном пакете Ansys реализован дополнительный программный модуль Optimetrics. Данный модуль позволяет путем перебора параметров автоматизировать процесс расчета геометрии электрической машины, задавая область данной оптимизации. Система успешно используется в программе Ansys Maxwell. В программе реализуются метод логического нелинейного программирования, прямого поиска, квазиньютоновский метод и т. д.

Одним из распространенных методов оптимизации является параметрический анализ, позволяющий варьировать пользовательский параметр в определенной области данных. В этом случае можно определить оптимальное отношение варьируемого параметра к электромагнитному параметру машины. В качестве примера можно представить оптимизацию спинки статора в зависимости от электромагнитного момента (рис. 2).

Следующим этапом выступает оптимизация толщины вставок в роторе типа TLA. Для этого необходимо воспользоваться оптимизированным расчетом программы Ansys Optimerics. Это позволит подобрать толщину пластин таким образом, что на валу двигателя будет наводиться максимальный электромагнитный момент. Результаты оптимизации можно видеть на рис. 3.




a) b)

**Рис. 2. Оптимизация толщины спинки статора: a – разрез статора СРМ; b – зависимость крутящего момента от толщины спинки статора**
**Fig. 2. Optimization of the thickness of the stator back: a – the stator section CM; b – the dependence of the torque on the thickness of the stator back**

Setup Optimization

Goals | Variables | General | Options

| Variable | Override | Starting Value | Units | Include | Min | Units | Max | Units | Min Focus | Units | Max Focus | Units |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| a2 | ☐ | 0.4154 | mm | ☑ | 0.4 | mm | 1.2 | mm | 0.4 | mm | 1.2 | mm |
| a3 | ☐ | 0.3315 | mm | ☑ | 0.325 | mm | 0.975 | mm | 0.325 | mm | 0.975 | mm |
| a4 | ☐ | 0.2802 | mm | ☑ | 0.275 | mm | 0.825 | mm | 0.275 | mm | 0.825 | mm |
| a5 | ☐ | 0.2423 | mm | ☑ | 0.225 | mm | 0.675 | mm | 0.225 | mm | 0.675 | mm |

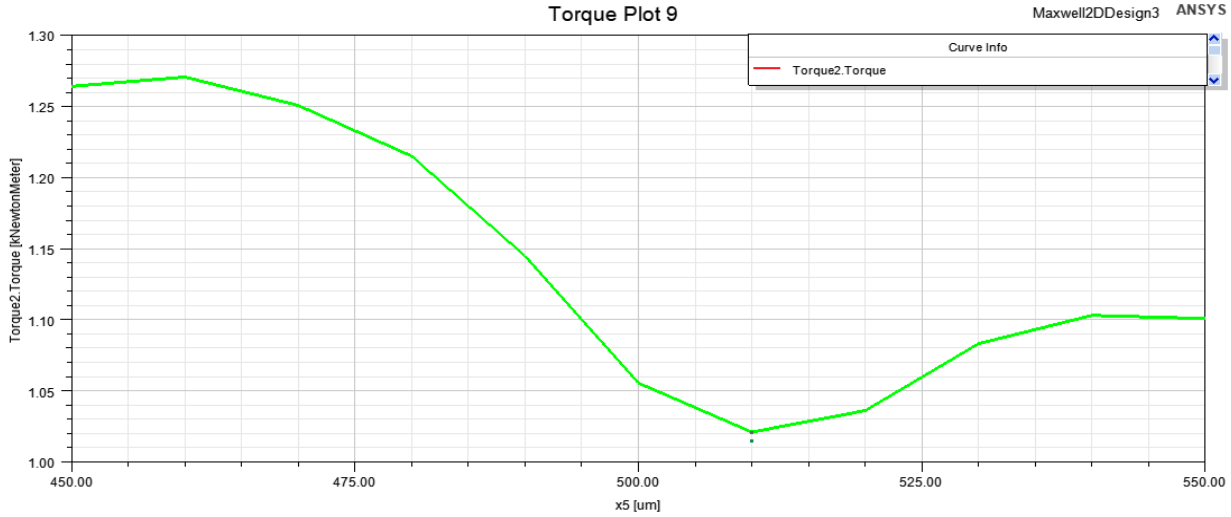



**Рис. 3. Зависимость крутящего момента от толщины немагнитных вставок в роторе типа TLA**
**Fig. 3. The dependence of the torque on the thickness of non-magnetic inserts in the rotor type TLA**

Таким образом, при оптимизации геометрических параметров электродвигателя большой мощности до 1 МВт (1…10 кН·м крутящего момента) с применением пространственной модели методом конечных элементов позволяет достигнуть дополнительные 5 % крутящего момента при изменении толщины спинки статора и до 25 % при изменении толщины немагнитных вставок в роторе типа TLA.

**Заключение**

Проектирование электропривода – сложная многовариантная задача. При её решении приходится учитывать большое количество факторов. Пример расчета электропривода на базе синхронного реактивного двигателя позволил определить правильную геометрию статора, произвести выбор статорной обмотки, которая впоследствии должна выдерживать различные значения тока при нагрузке двигателя свыше номинальных параметров. Необходимым параметром энергоэффективной работы двигателя также является форма питающего напряжения и количество фаз в обмотке статора, для синхронных реактивных машин наилучшим вариантом является прямоугольная или трапецеидальная форма напряжения, что является преимуществом при питании от частотного преобразователя.

Результаты оптимизации комплекса «полупроводниковый преобразователь – двигатель» для широкого класса систем электроприводов по мощности и типам электрических машин показывают, что в диапазоне мощности до 1 МВт пространственная модель электродвигателя позволяет оптимизировать геометрию электрической машины по критерию максимального крутящего момента с увеличением последнего до 25 %. Новизна предлагаемых результатов заключается в более широком и системном подходе, когда оптимизация электромеханических систем выполняется не только для новых и специальных машин, причем в достаточно частном случае фрагментарного характера. Предлагаемый подход позволяет сделать первую оценку эффекта от оптимизации и может быть обоснованием более детальных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ для конкретного случая.

В некоторых случаях ожидаемый эффект может достигать 30 %. Такой синергетический эффект может быть пояснен на самом простейшем примере, когда выполняется оптимизация классического синхронного реактивного двигателя с простым (несоставным) ротором. При переходе к системе электропривода и реализации закона управления полупроводниковым преобразователем частоты в функции положения ротора удается не заботиться о статической устойчивости системы и реализовывать режим управления, при котором угол нагрузки может быть максимальным, при этом связанный с ним электромагнитный момент также оказывается максимальным.

**Список литературы**

1. Magureanu R., Vasile N. Magnetic field and steady-state parameters of flux barrier reluctance synchronous motors // Revue roumaine de sciences techniques. Serie electrotechnique et energetique. 1979. Vol. 24, no. 3. P. 465–477.

2. Lipo T.A. Performance calculations of a reluctance motor drive by dq harmonic balance // IEEE Trans Ind Appl. 1979. Vol. IA-15, no. 1. P. 25–35. DOI: 10.1109/TIA.1979.4503609

3. Du Z.S., Lipo T.A. Design of an improved dual-stator ferrite magnet vernier machine to replace an industrial rare-earth ipm machine // IEEE Trans Energy Convers. 2019. Vol. 34, no. 4. P. 2062–2069. DOI: 10.1109/TEC.2019.2931496

4. Modular stator flux and torque control of multi-three-phase induction motor drives / S. Rubino, I.R. Bojoi, F. Mandrile, E. Armando // IEEE Trans Ind Appl. 2020. Vol. 56, no. 6. P. 6507–6525. DOI: 10.1109/TIA.2020.3022338

5. Synchronous reluctance machine geometry optimisation through a genetic algorithm based technique / M. Ruba, F. Jurca, L. Czumbil et al. // IET Electr Power Appl. 2018. Vol. 12, no. 3. P. 431–438. DOI: 10.1049/iet-epa.2017.0455

6. Salazar L.D., Ziogas P.D. A single-ended SMR converter topology with optimized switching characteristics // IEEE Trans Power Electron [Internet]. 1989. Vol. 4, no. 1. P. 53–63. DOI: 10.1109/63.21872

7. Wang X., Palka R., Wardach M. Nonlinear digital simulation models of switched reluctance motor drive // Energies. 2020. Vol. 13, no. 24. P. 6715. DOI: 10.3390/en13246715

8. Григорьев М.А. Синхронный реактивный электропривод с независимым управлением по каналу возбуждения и предельными характеристиками по быстродействию и перегрузочным способностям: специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»: дис. … д-ра техн. наук. Челябинск, 2013. 325 с.

9. Усынин Ю. С., Григорьев М. А. Тепловая модель электрической машины прокатного стана // Электротехника. 2022. № 2. С. 12–16. DOI: 10.53891/00135860_2022_2_12

10. Белоусов Е.В., Григорьев М.А., Хрюкин Д.Ю. Электропривод системы верхнего привода буровой установки // Электротехника. 2022. № 2. С. 17–21. DOI: 10.53891/00135860_2022_2_17

**References**

1. Magureanu R., Vasile N. Magnetic field and steady-state parameters of flux barrier reluctance synchronous motors. *Revue roumaine de sciences techniques. Serie electrotechnique et energetique*. 1979;24(3):465–477.

2. Lipo T.A. Performance calculations of a reluctance motor drive by dq harmonic balance. *IEEE Trans Ind Appl*. 1979;IA-15(1):25–35. DOI: 10.1109/TIA.1979.4503609

3. Du Z.S., Lipo T.A. Design of an improved dual-stator ferrite magnet vernier machine to replace an industrial rare-earth ipm machine. *IEEE Trans Energy Convers* 2019;34(4):2062–2069. DOI: 10.1109/TEC.2019.2931496

4. Rubino S., Bojoi I.R., Mandrile F., Armando E. Modular stator flux and torque control of multi-three-phase induction motor drives. *IEEE Trans Ind Appl*. 2020;56(6):6507–6525. DOI: 10.1109/TIA.2020.3022338

5. Ruba M., Jurca F., Czumbil L., Micu D.D., Martis C., Polycarpou A., Rizzo R. Synchronous reluctance machine geometry optimisation through a genetic algorithm based technique. *IET Electr Power Appl.* 2018;12(3):431–438. DOI: 10.1049/iet-epa.2017.0455

6. Salazar L.D., Ziogas P.D. A single-ended SMR converter topology with optimized switching characteristics. *IEEE Trans Power Electron [Internet]*. 1989;4(1):53–63. DOI: 10.1109/63.21872

7. Wang X., Palka R., Wardach M. Nonlinear digital simulation models of switched reluctance motor drive. *Energies.* 2020;13(24). DOI: 10.3390/en13246715

8. Grigoriev M.A. *Sinkhronnyy reaktivnyy elektroprivod s nezavisimym upravleniyem po kanalu vozbuzhdeniya i predel'nymi kharakteristikami po bystrodeystviyu i peregruzochnym sposobnostyam: dis. d-ra tekhn. nauk* [Synchronous reluctance electric drive with independent control over the excitation channel and limiting characteristics in terms of speed and overload capacity. Doct. sci. diss.]. Chelyabinsk, 2013. 325 p. (In Russ.)

9. Usynin Y.S., Grigoriev M.A. A Thermal Model of an Electric Rolling-Mill Machine. *Russ. Electr. Engin*. 2022;93(2):71–75. DOI: 10.3103/S1068371222020146

10. Belousov E.V., Grigorev M.A., Khryukin D.Y. An Electric Drive for a Drilling-Rig Top-Drive System. *Russ. Electr. Engin*. 2022;93(2):76–80. DOI: 10.3103/S1068371222020031

***Информация об авторах***

**Хрюкин Дмитрий Юрьевич**, аспирант, кафедра электропривода, мехатроники и электромеханики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; dmitry.khriukin@yandex.ru.

**Тулегенов Ерлан Муратович**, аспирант, кафедра электропривода, мехатроники и электромеханики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; erlan.tulegenov2017@yandex.ru.

**Семенова Ксения Дмитриевна**, аспирант, кафедра электропривода, мехатроники и электромеханики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; volbergskd@gmail.com.

**Кушнарев Виктор Александрович**, студент, кафедра техники, технологий и строительства, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; a55538a@yandex.ru.

**Сычев Дмитрий Александрович**, канд. техн. наук, доц., кафедра электропривода, мехатроники и электромеханики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; sychevda@susu.ru.

***Information about the authors***

**Dmitry Yu. Khriukin**, Postgraduate Student, Department of Electric Drive and Mechatronics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; dmiry.khriukin@yandex.ru.

**Erlan M. Tulegenov**, Postgraduate Student, Department of Electric Drive and Mechatronics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; erlan.tulegenov2017@yandex.ru.

**Kseniya D. Semenova,** Postgraduate Student, Department of Electric Drive and Mechatronics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; volbergskd@gmail.com.

**Victor A. Kushnarev**, Bachelor Student, Department of Engineering, Technology and Construction, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; a55538a@yandex.ru.

**Dmitry A. Sychev**, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Department of Electric Drive, Mechatronics and Electromechanics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; sychevda@susu.ru.

***Статья поступила в редакцию 15.09.2022; одобрена после рецензирования 30.09.2022; принята к публикации 30.09.2022.***

***The article was submitted 15.09.2022; approved after review 30.09.2022; accepted for publication 30.09.2022.***