



## УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

Н.И. Смоленцев<sup>1\*</sup>, Л.М. Четошникова<sup>2</sup>, А.Н. Игнатов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,  
Россия

<sup>2</sup>Филиал Южно-Уральского государственного университета (НИУ) в  
г. Миассе, Россия

ORCID\*: <http://orcid.org/0000-0002-5775-2903>, [smolenzev@rambler.ru](mailto:smolenzev@rambler.ru)

**Резюме:** Разработка системы интеллектуального управления накопителем энергии является актуальной научно-технической задачей. Эта система должна обеспечить максимальную эффективность применения накопителя энергии в силовых сетях различного назначения. Электромеханический накопитель энергии является преобразователем электрической энергии в механическую и содержит в своем составе электрическую машину. Например, в основу конструкции сверхпроводящего электромеханического накопителя энергии (СПЭНЭ-1) положена обращенная синхронная электрическая машина с постоянными магнитами и с бесконтактным подвесом ротора-маховика. Основными функциональными блоками системы управления скоростью вращения ротора-маховика являются: датчик нагрузки силовой сети, система передачи и обработки информации, устройство управления скоростью вращения ротора-маховика синхронного обращенного двигателя СПЭНЭ-1. Для обоснования необходимости управления накопителем энергии в статье рассмотрены графики нагрузки предприятия. Определены требования к системе управления. Оптимальным методом является векторное управление накопителем энергии. Векторное управление применяют, как правило, в синхронных двигателях узкоспециального назначения. В принципе, этот метод применим ко всем типам трехфазных двигателей переменного тока. Он представляет большой интерес и для применения в системе управления накопителем энергии. В статье рассмотрены вопросы применения накопителя энергии в распределительных сетях промышленного предприятия и обоснования векторного метода управления обращенным синхронным двигателем накопителя энергии СПЭНЭ-1, приведена блок-схема системы векторного управления двигателем накопителя энергии и результаты ее моделирования в среде MatLab (Simulink).

**Ключевые слова:** накопитель энергии, СПЭНЭ-1, векторное управление, ШИМ-регулятор.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», идентификационный номер проекта RFMEFI57818X0265 (соглашение от 27.11.2018 г. № 075-02-2018-209 (14.578.21.0265)). Заказчик - Министерство образования и науки Российской Федерации.

**Для цитирования:** Смоленцев Н.И., Четошникова Л.М., Игнатов А.Н. Управление электромеханическим накопителем энергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. №6. С.3-10. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-3-10.

## ELECTROMECHANICAL DRIVE MANAGEMENT ENERGY

NI Smolentsev<sup>1\*</sup>, LM Chetoshnikova<sup>2</sup>, AN Ignatov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian State University of Telecommunications and Informatics, Russia,

<sup>2</sup>Branch of the South Ural State University (NRU) in Miass, Russia.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5775-2903>

**Abstract:** The development of an intelligent energy storage management system is an up-to-date scientific and technical challenge. This system should ensure maximum efficiency of energy storage in power networks for various purposes. The article discusses the use of energy storage in distribution networks of an industrial enterprise and substantiation of the vector control method of the inverted synchronous motor of the energy storage SPENE-1, shows a block diagram of the vector system for controlling the energy accumulator motor and the results of its simulation in MatLab.

**Keywords:** energy storage, SPENE-1, vector control, PWM controller.

**Acknowledgments:** This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the implementation of the Federal Targeted Program “Research and Development in Priority Directions for the Development of the Scientific and Technological Complex of Russia for 2014–2020”, the project identification number is RFMEFI57818X0265 (agreement of 11.27.2018 № 075-02-2018-209 (14.578.21.0265)). The customer is the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

**For citation:** Smolentsev NI, Chetoshnikova LM, Ignatov AN. Electromechanical drive management energy. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(6):3-10. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-3-10.

### Введение

Электромеханический накопитель энергии является преобразователем электрической энергии в механическую и содержит в своем составе электрическую машину. Например, в основу конструкции сверхпроводящего электромеханического накопителя энергии (СПЭНЭ-1) положена обращенная синхронная электрическая машина с постоянными магнитами и с бесконтактным подвесом ротора-маховика [1-5]. Важным моментом практического применения накопителя энергии является разработка интеллектуальной системы управления режимами его работы и прежде всего частотой вращения ротора-маховика. С точки зрения уменьшения габаритов накопителя и увеличения его удельных параметров целесообразно управлять скоростью вращения, поскольку запасенная в накопителе механическая энергия пропорциональна моменту инерции ротора-маховика и квадрату скорости его вращения

$$W = \frac{J\Omega}{2}, \quad (1)$$

где  $\Omega = 2\pi n$  – круговая скорость вращения ротора-маховика [рад/сек],  $n$  – скорость вращения ротора-маховика [об/сек],  $J = \int r^2 dm$  – момент инерции ротора-маховика,  $r$  – расстояние от элемента массы  $dm$  – до оси вращения.

Основными функциональными блоками системы управления скоростью вращения ротора-маховика являются: датчик нагрузки силовой сети, система передачи и обработки информации, устройство управления скоростью вращения ротора-маховика синхронного обращенного двигателя СПЭНЭ-1.

Поскольку эффективность применения накопителя энергии во многом зависит от оптимального управления синхронным двигателем, то выбор и обоснование метода, позволяющего оптимизировать рабочие параметры накопителя энергии, является актуальной научно-технической задачей.

Известны различные методы управления частотой вращения синхронного двигателя [6-10]. Применительно к синхронному двигателю накопителя энергии метод управления и его аппаратная реализация должны удовлетворять специфическим

требованиям: это широкий диапазон регулирования частоты вращения, позволяющий расширить эффективность работы накопителя энергии, устойчивость системы управления, недопустимость выхода двигателя из синхронизма, иначе может произойти сбой в работе бесконтактного подвеса ротора-маховика и переход накопителя энергии в аварийный режим. Поскольку ротор-маховик СПЭНЭ - 1 находится в вакуумированной полости статора синхронной машины, должно быть минимальное количество соединительных элементов и выводов. Важны и такие требования, как простота, надежность, ценовая доступность, что будет способствовать массовому применению накопителей.

Целью работы является разработка системы управления электромеханическим накопителем энергии в распределительных сетях различного назначения.

#### Материалы и методы

Для обоснования необходимости управления накопителем энергии в силовой сети, рассмотрим графики нагрузки предприятия. На рисунках приведены суточные графики нагрузки предприятия без накопителя энергии (рис. 1), график работы накопителя энергии в управляемом режиме (рис. 2) и график нагрузки предприятия с накопителем энергии (рис. 3) [11-13].

Как следует из анализа графиков, накопитель энергии позволяет значительно выровнять неравномерный график нагрузки и снизить величину максимальной нагрузки, что позволит предприятию перейти на более дешевый тариф, обеспечить работу оборудования в режиме, близком к номинальному, снизить пиковые перегрузки оборудования. Кроме снижения прямых затрат на электроэнергию уменьшаются косвенные затраты, например, на ликвидацию последствий аварий, вызванных работой оборудования в режиме перегрузки. Расчеты показывают, что таким образом можно повысить энергосбережение на предприятии до 40 % .

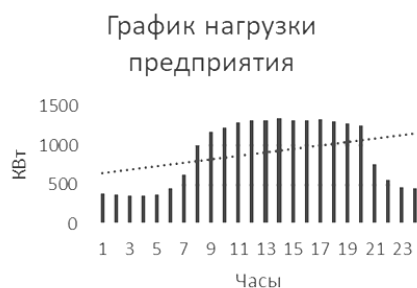


Рис. 2. Суточный график нагрузки предприятия без накопителя энергии



Рис. 3. График работы накопителя энергии



Рис.4. График нагрузки предприятия с накопителем энергии в распределительной сети

Приведенные экспериментальные данные показывают, что необходима система интеллектуального управления, позволяющая по графику нагрузки потребителя электрической энергии автономно управлять режимами работы накопителя энергии, обеспечивая при этом максимальный режим энергосбережения и энергоэффективности.

Исходя из этих требований к методу управления накопителя энергии, проанализируем известные методы управления двигателями переменного тока. Наиболее распространен метод управления синхронным двигателем с датчиком углового положения ротора. Однако, реализация данного способа применительно к накопителю будет достаточно сложной и дорогой. Бездатчиковый режим управления реализуется в скалярном способе управления, когда положение ротора двигателя определяют по величине противо-ЭДС в одной из трех фаз переменного тока статорной обмотки, однако в этом случае уменьшается момент двигателя и устойчивость его работы, уменьшаются удельные характеристики накопителя энергии.

Метод векторного управления лишен выше указанных недостатков, его широко применяют в асинхронных двигателях. Векторное управление применяют, как правило, в синхронных двигателях узкоспециального назначения. В принципе, этот метод применим ко всем типам трехфазных двигателей переменного тока. Он представляет большой интерес и для применения в системе управления накопителем энергии СПЭНЭ-1 [14].

Векторная система управления синхронным двигателем строится во вращающейся системе координат, в которой управляемый параметр момент двигателя  $M$  является неподвижным и его величина определяется выражением

$$M = \frac{3}{2} Z_p I_{sq} \Psi_f \quad (2)$$

где  $Z_p$  – число пар полюсов неявнополюсной синхронной машины,  $I_{sq}$  – статорный ток,  $\Psi_f$  – потокосцепление, создаваемое магнитным полем постоянных магнитов.

Как следует из выражения (2), величина момента двигателя зависит только от  $q$  – составляющей статорного тока,  $d$  – составляющая статорного тока является паразитной, приводящей к дополнительным потерям и ее поддерживают равной нулю. Схема векторного управления синхронным двигателем СПЭНЭ-1 приведена на рис. 5.

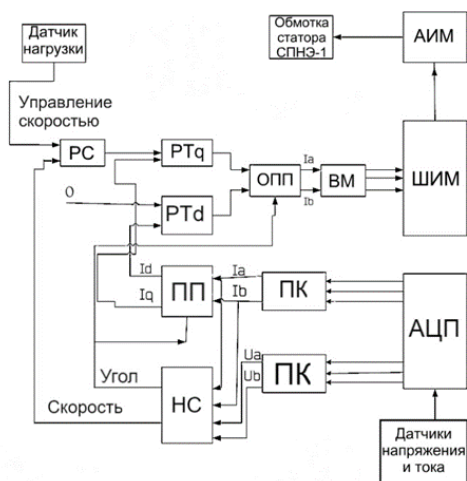


Рис. 5. Схема векторного управления синхронным двигателем накопителя энергии СПЭНЭ-1

На рис. 5 приняты следующие сокращенные обозначения: РС – регулятор скорости, НС – наблюдатель состояния, ОПТ – обратное преобразование Парка, ПП – преобразование Парка, ВМ – пространственно-векторный преобразователь, ПТq и ПТd – пропорционально-интегральные регуляторы токов во вращающейся системе координат, АЦП – аналого-цифровые преобразователи, ШИМ – широтно-импульсный модулятор, АИИ – автономный инвертор напряжения. Сигналы с датчиков тока и напряжения статорной обмотки СПЭНЭ-1 поступают на блок АЦП, затем выполняется преобразование системы координат – из трехфазной системы координат в декартову систему координат (преобразование Кларка, на схеме ПК), затем из декартовой системы координат во вращающуюся систему координат (преобразование Парка, на схеме ПП).

В результате получают два сигнала тока (на схеме обозначены  $I_d$  и  $I_q$ ). Для обоих сигналов устанавливаются пропорционально-интегральные регуляторы (на схеме обозначены  $PTq$  и  $PTd$ ). Сигналы с выхода регуляторов преобразуются обратно в декартову систему координат (на схеме обратное преобразование Парка, ОПП). Пространственно-векторный модулятор (на схеме ВМ) осуществляет расчет необходимых параметров силовых ключей и последовательность коммутации для управления с помощью широтно-импульсного модулятора (ШИМ) автономным инвертором (АИМ).

Регулятор скорости – это внешний сигнал, поступающий с датчика нагрузки силовых шин распределительной сети предприятия по необходимым параметрам с помощью накопителя энергии. При уменьшении нагрузки накопитель энергии должен забирать неиспользованную энергию из сети, для чего на регулятор скорости РС поступает сигнал на увеличение скорости вращения ротора-маховика СПЭНЭ-1 и переводе накопителя энергии в режим двигателя. Затем накопитель энергии определенное время, зависящее от типа потребителя, сохраняет накопленную энергию. При возрастании нагрузки в сети, на регулятор скорости поступает сигнал о снижении скорости вращения ротора-маховика и переходе накопителя в режим генератора. В этом режиме скорость вращения ротора-маховика падает до минимальной, накопитель переходит в режим генератора и отдает накопленную энергию в силовую сеть.

Для реализации векторного способа используется наблюдатель состояния (на рис. 5 обозначен НС). Он рассчитывает текущий угол поворота ротора-маховика, выполняет расчет скорости и момента двигателя, а также управляет переходами накопителя в режим двигателя и генератора, выполняя функции интеллектуального управления. Его устройство и функции применительно к накопителю энергии являются предметом последующих исследований и разработок.

#### Результаты исследования

Важным элементом векторного способа управления накопителем энергии является ШИМ-регулятор [15]. Для управления двигателем необходимо сформировать пакет сигналов, чтобы средний (интегральный) ток имел необходимое значение, а время интеграции пакета должно быть в 5–10 раз меньше одного оборота двигателя. Скорость вращения двигателя составляет ( $10^3 - 10^4$ ) оборотов в секунду и, соответственно, один оборот двигателя выполняется за время  $(1-0,1)10^{-3}$  секунды. Интерфейс RS-485, по которому предполагается передавать данные управления, работает на частотах до 2 мегагерц (500 наносекунд). Следовательно, такие сигналы можно сформировать для непрерывного управления двигателем накопителя энергии.

Для примера рассмотрим формирование пакета сигналов из 8 байт. Период для учета среднего тока состоит из 8 байт, это равно  $10 \times 8 = 80$  тактовых интервалов. Скважность сигнала управления изменяется в диапазоне от 8/80 до 72/80 на интервале в 8 байт.

На рис. 6 приведена зависимость управляемого тока при разных сериях сигналов. Из анализа графиков, приведенных на рис. 6, следует, что ШИМ – регулятор обеспечивает линейность управления в необходимом частотном интервале управления синхронным двигателем.

Исследование работы векторного управления в соответствии со схемой, приведенной на рис. 5, было проведено способом моделирования в среде *MatLab* (*Simulink*). Опытные параметры синхронного двигателя СПЭНЭ-1, используемые при моделировании, приведены в таблице.

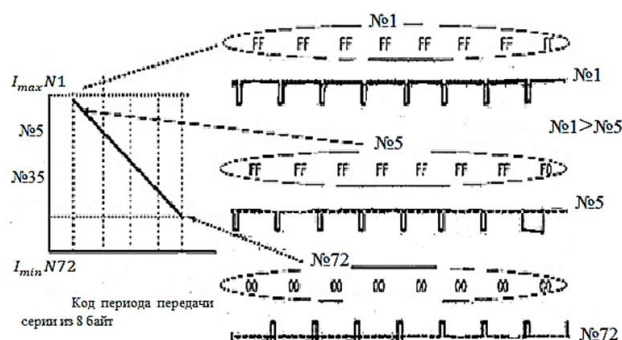


Рис. 6. Средний интегральный ток при разных сериях сигналов

Опытные параметры синхронного двигателя СПЭНЭ-1									
$U$ , В	$P$ , кВт	$M$ , Нм	$R_s$ , Ом	$L_{sd}$ , мГн	$L_{sq}$ , мГн	$\Psi_f$ , Вб	$J$ , кг·м <sup>2</sup>	$P_n$	$\beta$
200	7,5	66	0,96	2,25	5,25	0,183	0,013	4	0

На рис. 7 приведен график управления скоростью вращения ротор-маховика в диапазоне от 0 до 15000 об/мин., полученный в результате моделирования векторного управления синхронным двигателем СПЭНЭ-1 в среде *MatLab (Simulink)* при разных значениях напряжения на статорных обмотках обращенного синхронного двигателя СПЭНЭ-1. ( $U_{ст} = 380$  В, 1500 В, 3000 В, 3800 В).

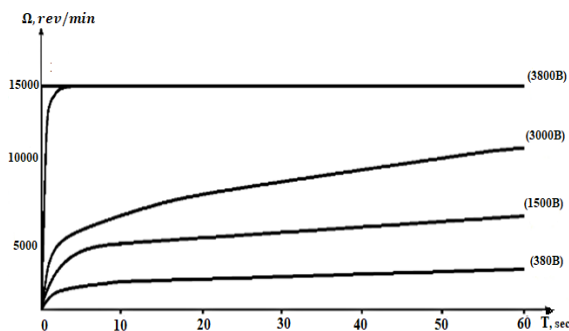


Рис. 7. Моделирование в среде *Matlab (Simulink)* управления скоростью вращения ротора-маховика синхронного двигателя СПЭНЭ-1

Как следует из графиков, приведенных на рис. 7, время разгона двигателя накопителя энергии до необходимой скорости вращения зависит не только от сигнала управления, но и также от напряжения статорных обмоток, что необходимо учитывать при выборе параметров накопителя энергии.

#### Выводы

В работе [16] отмечалось, что гармонический анализ Фурье графика нагрузки позволяет рассчитать параметры накопителя энергии в зависимости от амплитуды и частоты выбранной гармоники спектра мощности. При дальнейшем развитии данного метода можно предположить, что интеллектуальная система управления режимом работы накопителя также может быть построена на спектральном разложении графика нагрузки потребителя энергии. Для этого необходимо использовать сигнал с датчика нагрузки в схеме векторного управления синхронным двигателем накопителя энергии СПЭНЭ-1 на частоте необходимой гармоники спектра нагрузки. В следующей работе предполагается детальная разработка схемы управления, определение требований к блокам и элементам схемы управления и проведение следующих этапов моделирования в среде *MatLab (Simulink)*.

#### Заключение

В работе рассмотрена возможность применения для управления накопителем энергии СПЭНЭ-1 векторного метода, который по ряду причин является предпочтительным. На примере графиков нагрузки промышленного предприятия указан способ оптимизации энергосбережения и энергоэффективности путем векторного управления накопителем энергии. Приводится блок-схема векторного управления для накопителя энергии, обсуждены требования к ШИМ – регулятору. В среде *MatLab (Simulink)* проведено моделирование системы векторного управления накопителем энергии и получены графики зависимости скорости вращения ротора-маховика СПЭНЭ-1 от времени. Предложено использование гармонического анализа Фурье для применения в системе управления электромеханическим накопителем энергии.

#### Литература

1. Смоленцев Н.И., Кондрин С.А. Сверхпроводящий электрокинетический накопитель энергии для локальных электрических сетей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017, Т.19. № 3-4. С.53-60.
2. Смоленцев Н.И. Электромеханический сверхпроводящий накопитель энергии. Пат. 2601590 Российская Федерация, МПК7 H02K 7/02, H02K 7/09. № 2015115350/07, опубл. 10.11.2016.

Бюл. № 31.

3. Матвеев В.А. Сверхпроводящий магнитный подвес для кинетического накопителя энергии: пат. 2551864 Российская Федерация: МПК7 F 16 C 32/04. заявл. 04.04.2014.
4. Korelsky DV, Potapenko EM, Vasilyeva. Review of modern methods of control of synchronous motors with permanent magnets. // Radio electronics. Computer science. Control. 2001;2:155-159.
5. Experimental Setup and Efficiency Evaluation of Zero-Field-Cooled ZFCYBCO Magnetic Bearings // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2017. Т. 27. №4. С.360-1105.
6. Superconductive and energy-storage magnetic suspension flywheel with high energy density: пат. CN102664567 Китай: МПК7 H 02 K 7/02. заявл. 11.05.2012.
7. Pieronek T.J., Decker D.K., Spector V.A. Spacecraft Flywheel Systems -Benefits and Issues. IEEE, 1997. Иосифьяновские чтения. 2016.
8. Корельский Д.В., Потапенко Е.М., Васильева. Обзор современных методов управления синхронными двигателями с постоянными магнитами // «Радиоэлектроника. Информатика. Управление». 2001. № 2. С. 155-159.
9. Коробко Г.И., Хватов О.С., Коробко И.Г. Разработка и моделирование дизель - генератора с изменяемой частотой вращения в судовой единой электроэнергетической установке системе // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2017. №1. С. 55-61.
10. Шевченко В.П., Бабийчук О.Б. Синхронный двигатель при частотном регулировании // Электротехнические и компьютерные системы. 2014. №14 (90). С.39-42.
11. Ali Emadi. Energy-efficient Electric Motors, Third Edition, Revised and Expanded. (2005), New York, Marsel Dekker Inc., 400 p.
12. Латочкин И.В., Смоленцев Н.И. Выбор параметров накопителя энергии и оптимизация системы электроснабжения предприятия // Ползуновский вестник. 2016, № 4-2. С.65-69.
13. Балувев Д.Ю., Зырянов В.М., Кирьянова Н.Г., Пранкевич Г.А. Методика расчета основных параметров накопителя энергии по экспериментальным нагрузочным диаграммам // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 5(136). С. 105.
14. Songa. Z., Lib J, Hou. J., et al. He Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System in Electric Vehicle Applications: A Case Stud // Energy. N.154. 2018. pp. 433-441.
15. Ковальчук Д.А., Мазур А.В. Векторное управление синхронным электродвигателем // Автоматизация технологических и бизнес-процессов. 2014. № 17. С. 71-75.
16. Игнатов А.Н., Кувардин К.В., Шабронов А.А. Метод формирования сигнала широтно-импульсной модуляции для управления двигателем постоянного тока: пат. 2665671 РФ, СибГУТИ. № 2015121006; опубл. 03.09.2018, Бюл. № 25.
17. Горте О.И., Зырянов В.М., Кирьянова Н.Г., Пранкевич Г.А. Метод выбора параметров накопителя энергии при резкопеременной нагрузке // Наука. Технологии. Инновации. Сборник научных трудов в 10 ч. Под ред. доц. Боруш О.В. Новосибирск: Издательство НГТУ, 2017. Ч. 4. С. 421.

#### Авторы публикации

**Смоленцев Николай Иванович** – канд. техн. наук, доцент кафедры технической электроники, Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики.

**Четошникова Лариса Михайловна** – д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизации электротехнического факультета, Южно-Уральского государственного университета.

**Игнатов Александр Николаевич** – канд. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технической электроники, Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики.

#### References

1. Smolentsev NI, Kondrin SA. Superconducting electrokinetic energy storage for local electrical networks. News of higher educational institutions. *Energy problems*. 2017;19(3-4):53-60.
2. Smolentsev NI. *Electromechanical superconducting energy storage*. Pat. 2601590 Russian Federation, IPC7 NC 7/02, NC 7/09. /№ 2015115350/07; Claims 04/23/2015; publ. 10.11.2016. Bul N. 31.
3. Matveev VA. *Superconducting magnetic suspension for kinetic energy storage*: Pat. 2551864 RF: МПК7 F 16 C 32/04. claimed 04.04.2014
4. Korelsky DV, Potapenko EM, Vasilyeva. Review of modern methods of control of synchronous motors with permanent magnets. *Radio electronics. Computer science. Control*. 2001;2:155-159.
5. Experimental Setup and Efficiency Evaluation of Zero-Field-Cooled ZFCYBCO Magnetic Bearings. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2017; 27(4). pp. 360-1105.
6. Tang J. *Superconducting and energy storage magnetic suspension flywheel with high energy*

*density: Pat. CN102664567 China: Ipc7 H 02 K 7/02.*

7. Pieronek TJ, Decker DK, Spector VA. Spacecraft Flywheel Systems -Benefits and Issues. IEEE, 1997. *Iosifyanovskie chteniya*. 2016.

8. Korelsky DV, Potapenko EM, Vasilieva. Review of modern methods of control of synchronous motors with permanent magnets. *Radio electronics. Computer science. Control*. 2001;2:155-159.

9. Korobko GI, Khvatov OS, Korobko IG. Development and simulation of a diesel generator with a variable rotation frequency in the ship's unified electric power installation system. *Vestnik of Ivanovo State Energy University*. 2017;1:55-61.

10. Shevchenko VP, Babiychuk OB. Synchronous motor with frequency regulation. *Electrical and computer systems*. 2014;4 (90):39-42.

11. Ali Emadi. *Energy-efficient Electric Motors*. 3ed revised and expanded. (2005), New York, Mar-sel Dekker Inc., 400 p.

12. Lyatochkin IV, Smolentsev NI. The choice of parameters of the energy storage and optimization of the enterprise's power supply system. *PolzunovskyVestnik*. 2016;4(2):65-69.

13. Baluev DYU, Zyryanov VM, Kiryanova NG, Prankevich GA. The method of calculating the main parameters of the energy storage on the experimental load diagrams. *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*. 2018;22:5(136):105.

14. Songa Z, Lib J, Hou J, et al. He Battery-Super capacitor Hybrid Energy Storage System in Electric Vehicle Applications: A Case Study. *Energy*. 2018;154:433-441. doi: 10.1016/j.energy.2018.04.148.

15. Kovalchuk DA, Mazur AV. Vector control of a synchronous motor. *Automation of technological and business processes*. 2014;17:71-75.

16. Ignatov AN, Kuvardin KV, Shabronov AA. *Method of forming a pulse-width modulation signal for direct current motor control*. Pat. 2665671 RF / SibSUTI. N. 2015121006; declare 06/02/2015; publ. 03.09.2018. Bull. N. 25 .

17. Gorte OI, Zyryanov VM, Kiryanova NG; Baruch OV editors. Method of choosing parameters of energy storage under alternating load. *Nauka. Technologies. Innovations*. Collection of scientific papers. Novosibirsk: Publishing house NGTU, 2017. pp.135-138.

#### **Authors of the publication**

**Nikolay I. Smolentsev** – Siberian State University of Telecommunications and Informatics, Russia. E-mail: smolentzev@rambler.ru.

**Larisa M. Chetoshnikova** – Branch of the South Ural State University in Miass, Russia.

**Alexander N. Ignatov** – Siberian State University of Telecommunications and Informatics, Russia.

*Поступила в редакцию*

*13 июля 2019г.*