



РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА МОДУЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ МАЛОМЕРНЫХ СУДОВ

Басенко В.Р., Цветков А.Н., Петров Т.И., Ибрагимова А.Р., Рахмаев Р.Н.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

vasiliybas123@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Переход на электрический вид транспорта становится все более и более актуальным, ввиду развития технологий в области электрических двигателей и накопителей энергии. Одной из задач, поставленных перед специалистами в области электрического транспорта, сегодня является переход водных видов транспорта с двигателей внутреннего сгорания на полностью электрический привод. В данной статье приведен расчет системы электрического привода модульной конструкции для маломерных судов. *ЦЕЛЬ.* Целью является разработка системы электрического привода для маломерных судов, которая позволит применить электрический двигатель и накопители электроэнергии на водном транспорте. *МЕТОДЫ.* В основе разработки системы электрического привода лежит метод модельно-ориентированного проектирования. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В результате получена блок-схема установки для маломерного судна. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Создание систем электрического привода модульной конструкции имеет низкую проработанность в отечественном машиностроении ввиду отсутствия развитой электротранспортной инфраструктуры, создание отечественных разработок в данной области носит стратегический характер для промышленности и энергетики.

Ключевые слова: электротранспорт; электрический привод; электрический двигатель; накопители энергии.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00099, <https://rscf.ru/project/24-29-00099/>

Для цитирования: Басенко В.Р., Цветков А.Н., Петров Т.И., Ибрагимова А.Р., Рахмаев Р.Н. Разработка системы электрического привода модульной конструкции для маломерных судов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 69-80. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-69-80.

DEVELOPMENT OF AN ELECTRIC DRIVE SYSTEM OF MODULAR DESIGN FOR SMALL VESSELS

Basenko V.R., Tsvetkov A.N., Petrov T.I., Ibragimova A.R., Rahmaev R.N.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

vasiliybas123@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* The transition to an electric mode of transport is becoming more and more relevant due to the development of technologies in the field of electric motors and energy storage devices. One of the tasks set for specialists in the field of electric transport today is the transition of water transport from internal combustion engines to a fully electric drive. This article provides a calculation of an electric drive system of a modular design for small vessels.

THE PURPOSE. The goal is to develop an electric drive system for small vessels, which will allow the use of an electric motor and energy storage devices in water transport. **METHODS.** The design of the electric drive system is based on the model-based design method. **RESULTS.** As a result, a block diagram of the installation for a small vessel was obtained. **CONCLUSION.** The creation of electric drive systems of modular design is poorly developed in the domestic mechanical engineering due to the lack of a developed electric transport infrastructure; the creation of domestic developments in this area is of a strategic nature for industry and energy.

Keywords: electric transport; electric drive; electric motor, energy storage devices.

Acknowledgments: The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-29-00099, <https://rscf.ru/en/project/24-29-00099/>

For citation: Basenko V.R., Tsvetkov A.N., Petrov T.I., Ibragimova A.R., Rahmaev R.N. Development of an electric drive system of modular design for small vessels. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (6): 69-80. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-6-69-80.

Введение (Introduction)

Цель исследования заключается в анализе существующих систем электрического привода и построение модульной системы для электрического привода маломерных судов. Электротранспорт является одним из основных трендов в современном мире, однако в России есть серьезные преграды для развития данной области, в частности, слаборазвитая инфраструктура заряда электротранспорта. Но использование двигателей внутреннего сгорания на различных видах транспорта сегодня вносят значительный вклад в снижение экологической безопасности транспортных систем. Все более актуальным сегодня становится применение электропривода для различных видов транспорта, что снижает использование углеводородов и повышает экологичность различных видов транспорта, в том числе и водного. Возникает возможность разработки систем электропривода ввиду многочисленных исследований в области накопителей энергии. Эволюция систем хранения энергии привела к разработке литий-ионных аккумуляторов. В настоящее время литий-ионные аккумуляторы стали доминирующей технологией, особенно на рынке электромобилей благодаря высокой удельной энергии и мощности, длительному жизненному циклу и отсутствию эффекта памяти [2]. Как правило, литий-ионные аккумуляторы соединяются последовательно и/или параллельно для создания системы накопления энергии с желаемым напряжением и емкостью.

Разработка системы электропривода для нового вида транспорта позволит исследовать применение современных электрических двигателей для новых эксплуатационных условий. Здесь также актуальным будет применение методов комплексной топологической оптимизации для разработки и электрических двигателей и в целом систем электропривода [7]. Анализ работ современных исследователей [3-5] показывает наличие проблемы в области проведения комплексной топологической оптимизации (КТО) систем электропривода, и электрических двигателей в частности, ведь проводя данную процедуру необходимо учитывать электромагнитные, прочностные, тепловые процессы при изменении конструкции двигателя. Также данные процессы коррелируются с конструкцией электротранспорта, в котором применяется тот или иной двигатель. Существующие методы КТО основаны сегодня на преобразовании конструкции двигателя путем распределения материалов. В частности, если необходимо оптимизировать электромагнитные характеристики двигателя, [1, 6-7].

Одно из главных направлений усовершенствования электрических двигателей – поиск оптимальных решений для создания комплексной модульной системы электропривода.

Литературный обзор (Literature Review)

Научной значимостью данного исследования является разработка системы электрического привода, в основе которой лежит метод модельно-ориентированного проектирования. Данный метод позволяет создать блочную систему электропривода с возможностью замены компонентов системы при изменении задач, стоящих при проектировании системы электропривода для судна. Основная цель данной статьи – представить модель системы электрического привода модульной конструкции для маломерных судов.

Экологические и экономические перспективы дают новый стимул для разработки экологически чистых, эффективных и устойчивых транспортных средств для различных видов транспорта. Транспорт с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) является основным источником загрязнения окружающей среды, влияющий, в том числе на изменение климата и процессы глобального потепления. За последние 10 лет количество автомобилей на нашей планете удвоилось примерно до миллиарда [1]. Статистика по другим видам транспорта имеет аналогичные показатели роста. Из-за возникновения экологических проблем транспортные технологии продолжают добиваться значительного прогресса во всех этих областях, а также благодаря инновациям в эффективности преобразования топлива в бензиновых двигателях, более чистым и тихим дизельным двигателям и более широкому использованию альтернативных видов топлива [2]. В этих условиях механические детали в транспортной промышленности заменяются на иные виды узлов, которые бы могли приводиться в действие с помощью только электрических двигателей. Механический привод напрямую подсоединяется к двигателю. По этой причине, независимо от циркуляции охлаждающей жидкости, всегда работает обычный механический водяной насос. Напротив, электрический водяной насос не подключен напрямую и может работать на разных скоростях. Замена механического водяного насоса электрическим водяным насосом может снизить потребление энергии. Для этого становится все более важным встроенный электрический водяной насос.

Однако ключевыми вопросами являются стоимость и надежность электрооборудования для электрического транспорта. Проблемы включают в себя суровые природные условия, где температура под капотом может достигать 150 °C. Также стоимость остается важнейшей проблемой, стоящей перед разработчиками электрооборудования для электрического транспорта [3]. Концепция электрического привода для маломерных судов уже рассмотрена в работах [3, 4]. В основном в данных статьях описывалась общая концепция разработки систем электрического привода для водного электротранспорта. Также представлена конструкция электрического двигателя для различных видов транспорта в работах [5, 6]. Эдварда С. Лавлейса и др. В данных работах рассмотрено влияние перехода на инверторное оборудование для оптимизации электрического привода, в основе которого лежат синхронные машины с постоянными магнитами. Авторами Суронг Хуангом и др. в работе [6] предложен подход определения размеров оборудования и уравнений расчета плотности мощности в области электрических накопителей.

Развитие технологий постепенно приводило к тому, что электрические двигатели становятся все эффективнее и дешевле, а аккумуляторы легче и мощнее. Уровень инженерной и технической мысли применительно к экологичным видам транспорта, как сухопутным, так и водным. Сегодня в области водного транспорта наиболее актуальным направлением является применение электропривода с помощью возобновляемых источников энергии, в частности солнечных батарей [4]. В таких системах, в качестве дополнительного движителя предусмотрено использование паруса, закрепляющегося на специально приспособленной для него складывающейся мачте.

Автономные солнечные энергосистемы позволяют отказаться от генераторов. Один из основных компонентов системы - солнечный модуль. Благодаря своей конструкции он может быть установлен на крышу или использоваться как навес, сохраняя геометрию и эстетичный вид лодки. Такие системы рассмотрены в работах авторов томского политехнического университета Бумагина О.В. и Однокопылова Г.И. «Судно с электроприводом от солнечной батареи», а также в работах иностранных авторов Alipour M., Esen E., Kizilel R и др. [1, 3, 6-7].

Но у таких систем есть недостаток – зависимость от солнечной инсоляции. Ввиду развития зарядной инфраструктуры, в частности с появлением технологий зарядных мобильных станций [6-7] теперь есть техническая возможность создавать системы электропривода с возможностью заряда аккумулятора на береговых зарядных станциях.

Основными элементами разрабатываемой модульной системы является электрический двигатель, аккумуляторные батареи и система управления батареями BMS. Вид применяемого электрического двигателя рассматривается из асинхронного и синхронного типа [9-10]. Для каждой лодки в зависимости от размеров и веса выбирают электромотор с определенной тягой, которая позволит вращать винт, судну передвигаться, сопротивляясь силе воды и ветра. К примеру, лодка весит 1 тонну, для нее выбирают электромотор с тяговым усилием 45 фунтов. Существует связь между тягой и мощностью в силе вращения винта лодки. Единица измерения мощности Вт (ватт) или лошадиная сила. Электродвигатель потребляет электрический ток, количество потребления зависит от нагрузок и емкости аккумулятора. Работает двигатель при рабочем напряжении в пределах 12-24 вольт. Регулируют скоростями с помощью переключения передач. Некоторые моторы обладают цифровым вариатором [11-12]. У лодочных моторов бывает разное место крепления носовое или кормовое. Для кормовых имеются резьбовые зажимы, крепят на транце. Чтобы установить на носу, нужна специальная монтажная платформа. Применение аккумулятора будет зависеть от требуемого запаса хода. Их построение будет основываться из опыта работ по созданию мобильной системы заряда электротранспорта [13-15].

Практической значимостью является расчет механических и электрических параметров системы электропривода для водного судна, которую можно применить для судна со следующими техническими характеристиками: номинальная мощность – 15 кВт Фактические обороты выходного вала – 970 об/мин; КПД – 88.0%; Номинальный ток – 32А (при 380В); Пусковой ток – 224 А; номинальный крутящий момент – 129Н/м.

Результаты разработки системы электрического привода модульной конструкции

План разработки системы электрического привода модульной конструкции для маломерных судов речного и морского назначения заключается в разработке системы с автономным питанием и ограничением массогабаритных показателей с блоками заряда и контроля состояния батарей мощностью до 15 кВт с запасом хода до 10 часов.

Силовая электрическая установка предназначена для установки на маломерные суда морского и речного назначения. Установка монтируется на место дизельного ходового двигателя в трюме судна. Зарядка аккумуляторов осуществляется от береговой зарядной станции. Аккумуляторные батареи имеют систему контроля и защиты BMS. Управление силовой установкой осуществляется от рычага управления ходом.

Разработана блок-схема системы электрического привода модульной конструкции, представленная на рисунке 1.

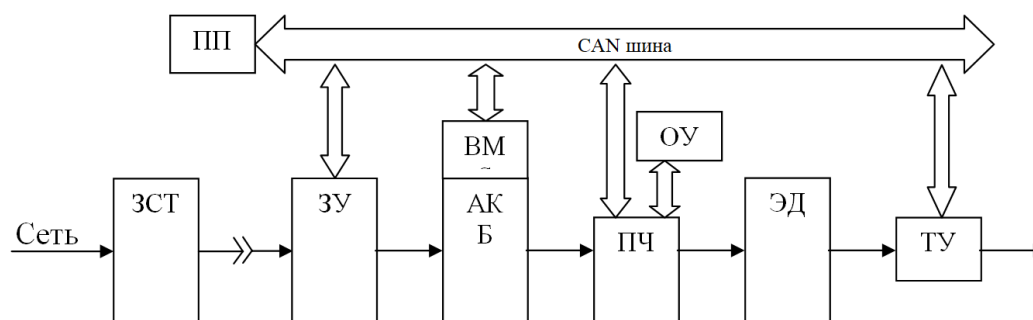


Рис. 1. Разработанная блок-схема установки электрического привода Fig. 1. Developed block diagram for installing an electric drive

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Данная блок-схема представляет следующий алгоритм работы установки электрического привода:

- к сети подключается станция для зарядки батарей (ЗСТ), которая расположена на берегу;
- сеть и ЗСТ связываются с помощью устройства преобразования напряжения в напряжение зарядки батарей с устройством согласования Type2;
- аккумуляторные батареи (АКБ) управляются системой контроля BMS;
- в системе предусмотрен силовой частотный преобразователь для работы электродвигателя (ЭД) с наличием обратной связи по положению ротора;
- предусмотрено тормозное устройство (ТУ) и устройство управления ходом (ОУ), которые будут связаны с панелью приборов системы управления силовой электрической установкой (ПП).

Силовая электрическая установка заряжается от сети переменного тока 380/220 В с частотой 50-60 Гц. Зарядная станция обеспечивает преобразование электроэнергии в напряжение и форму стандарта зарядки типа Type2, может содержать устройство управления оплатой за отпущенную энергию.

Станция располагается на берегу или причале в непосредственной близости от места швартовки судна на электрической тяге.

Зарядное устройство для преобразования напряжения питания в напряжение зарядки батарей с устройством согласования типа Type2 и кабелем зарядки. Устройство расположено на борту судна.

Аккумуляторные батареи расположены в непосредственной близости от приводного электродвигателя в моторном отсеке судна предположительно по бортам. Батареи имеют суммарное напряжение 72 В и емкость 280 Ач.

Контроль за состоянием батарей, режимом заряда и режимом разряда осуществляет система BMS. Силовой преобразователь частоты предназначен для питания электродвигателя и задания скорости его вращения, преобразователь имеет обратную связь с электродвигателем по положению ротора. Управление преобразователем осуществляется по командам рычага управления ходом.

Электродвигатель представляет собой асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором со встроенным энкодером мощностью 15 кВт.

Тормозное устройство представляет собой механическое устройство блокировки вращения вала гребного винта с электрическим управлением.

Панель приборов представляет собой устройство отображения состояния аккумуляторных батарей, отображения процесса заряда и разряда, отображения расчетного остаточного хода и оборотов гребного винта. Встроенный контроллер выполняет функцию системы управления силовой электрической установкой и связи между основными модулями. Состав основного электрооборудования системы электропривода маломерного судна представлен на рисунке 2.

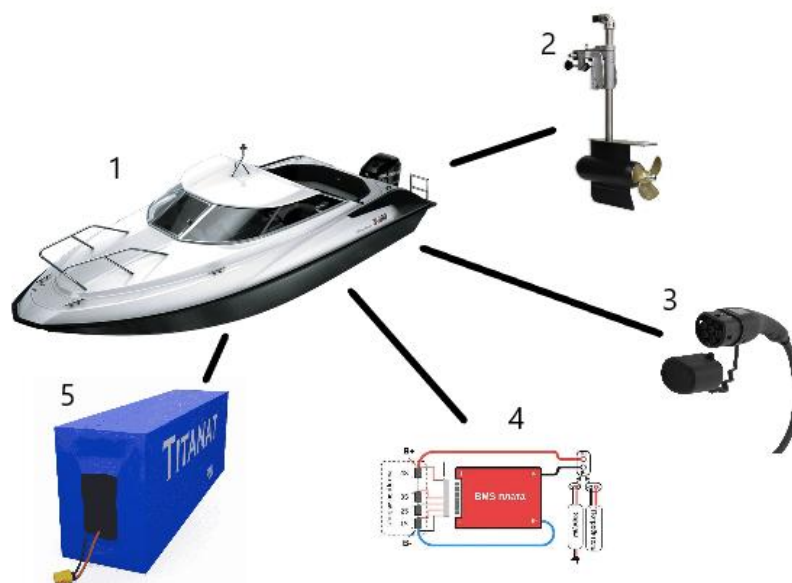


Рис. 2. Состав системы электропривода маломерного судна

Fig. 2. Composition of the electric drive system of a small vessel

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В состав системы, представленный на рисунке 2 входят: 1 – маломерное судно; 2 – электрический двигатель для судна типа Minn Kota; 3 – кабель зарядки типа Type2; 4 – плата BMS; 5 – аккумулятор 72V 280Ah.

Расчет параметров системы электрического привода

На водное судно в процессе движения действуют различные силы. Каждая из сил действует сразу на различные части корпуса или парусов, и действует по-разному. Но если просуммировать все эти составляющие, мы получим суммарную силу — вектор, который имеет результирующее направление и значение. Причем вектор этот будет прикладываться в определенную точку — место, где воздействие этой суммарной силы будет эквивалентно всем воздействиям ее составляющих в различных частях судна.

Для расчета механических параметров системы электропривода справедливы следующие выражения:

$$F_t = \mu \cdot m \cdot g + \frac{C_x \cdot S \cdot \rho \cdot v^2}{2}, \quad (1)$$

$$P = F \cdot v, \quad (2)$$

$$P_{дв} = \left(\mu \cdot m \cdot g + \frac{C_x \cdot S \cdot \rho \cdot v^2}{2} \right) \cdot v, \quad (3)$$

где C_x – коэффициент сопротивления воздуха;

S – лобовая площадь авто (m^2);

ρ – плотность воздуха ($1,29 \text{ кг/м}^3$ при нормальных условиях);

v – скорость авто, m/c .

Электродвигатели могут развивать ту же тягу, что и двигатели внутреннего сгорания обладая при этом значительно меньшей мощностью на валу. Это происходит благодаря различной форме кривых крутящего момента электрического и бензинового двигателей.

Технические характеристики разрабатываемой системы электропривода представлены в таблице 1.

Как правило, мощные электродвигатели рассчитаны на напряжение 24 - 72 Вольт. 24 вольтовый электрический двигатель мощностью 2,2 кВт развивает на винте тягу 139,8 lbs и сопоставим по этому показателю с подвесным бензиновым мотором мощностью 6,5 л.с. Двигатель мощностью 15 кВт эквивалентен бензиновому мотору 35 л.с.

Тяга 35 л.с. эквивалентна тяге трёх моторов Minn Kota Endura 55 с небольшим запасом. Этот двигатель потребляет 45 Ампер в час на максимальной скорости, суммарное потребление тока 135 Ампер в час. В таком режиме на 5 часов работы потребуется аккумулятор емкостью 675 А*ч.

Таблица 1
Table 1Технические характеристики системы электропривода
Electric drive system specifications

Технический параметр	Значение
Мощность электродвигателя	15 кВт
Тяга на винте	940 lbs
Номинальный ток	32 А
Пусковой ток	224
Крутящий момент	129 Н*м
КПД	88 %
Напряжение аккумулятора	72 В
Емкость аккумулятора	675 А*ч
Технология и материал аккумулятора	EVE LiFePO4
Время работы	3,5-5 ч

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В среднем, если сопоставить ёмкость аккумуляторов с расстоянием пробега, то можно выяснить, что современные виды электротранспорта потребляют примерно 120-150 ватт часов на 1 км пути. Если привод самодельного электромотоцикла имеет высокий КПД – используется безколлекторный электродвигатель на постоянных магнитах и эффективный контроллер, то расход энергии в различных режимах, будет примерно сопоставимым с разбегом в 10 %. Исходя из этого, можно рассчитать необходимую ёмкость аккумуляторной батареи для обеспечения того, или иного пробега.

На данный момент актуально провести сравнение с похожими системами для электромотоциклов, где АКБ с напряжением 96 вольт и ёмкостью 200 ампер часов, имеет мощность 19.2 киловатт часа ($96 \times 200 = 19200$ ватт часов). Этого количества энергии в рабочем режиме движения должно хватить примерно на 130-160 км. Чтобы получить эту цифру нужно 19200 ватт часов разделить на 120 ватт часов: получим максимальное значение пробега на одной зарядке. Затем 19200 делим на 150 ватт часов и получаем минимальное расстояние пробега.

Указанные цифры справедливы для электромотоциклов со снаряжённой массой, находящейся в пределах примерно от 1000 до 5000 кг. Если вес меньше или больше, то расход энергии и, соответственно, расстояние пробега, будет другим. Данные цифры выведены на основании изучения реальных эксплуатационных характеристик электрического транспорта.

Заключение (Conclusions)

В данной рассмотрена система электрического привода модульной конструкции для маломерных судов. Разработка системы электропривода для нового вида транспорта позволит исследовать применение современных электрических двигателей для новых эксплуатационных условий. Из проведенного анализа существующих систем, можно сделать вывод, что сегодня уже разработанной технологией является системы на основе солнечных батарей. Но недостатком данных является зависимость от солнечной инсоляции, что существенно ограничивает функционал и время использования электропривода. Ввиду развития зарядной инфраструктуры в России появилась возможность создания систем электропривода с аккумулятором, который будет заряжаться от береговой зарядной станции.

Разработана блок схемы системы электрического привода модульной конструкции, которая может быть применена для маломерных судов различного назначения и класса мощности. Полученные расчётные характеристики для системы электропривода являются приблизительными, так как они уточняются после натурных испытаний и проведения снятия характеристик с работающего водного транспорта с установленным электроприводом.

Приводной частью планируется использовать современные синхронные двигатели

с постоянными магнитами. СДПМ – современные, энергоэффективные электрические машины. Основные области их применения: микроприводы, приводы средней мощности, однако, уже есть разработки электродвигателей на постоянных магнитах более 1 МВт. СДПМ – перспективная замена коллекторных двигателей постоянного тока в приводах оборудования, работающего динамическом режиме, а также механизмов, требовательных к точности регулирования скорости, момента или положения вала. Синхронные двигатели на постоянных магнитах также в отдельных случаях предпочтительней асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором.

Создание систем электрического привода модульной конструкции имеет низкую проработанность в отечественном машиностроении ввиду отсутствия развитой электротранспортной инфраструктуры, поэтому создание отечественных разработок в данной области носит стратегический характер для промышленности и энергетики.

Литература

1. Alipour M., Esen E., Kizilel R. Investigation of 3-D multi-layer approach in predicting the thermal behavior of 20 Ah Li-ion cells // *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 153. P. 620–632. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.020>.
2. Safin, A. R. Thermal model of a linear electric machine / A. R. Safin, I. V. Ivshin, T. I. Petrov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Scientific Electric Power Conference 2019, ISEPC 2019, Saint Petersburg, 23–24 мая 2019 года*. Vol. 643. – Saint Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012014.
3. Tsvetkov A.N., Safin A.R., Ivshin I.V. [et al.] Adaptive control system of the pumping unit // *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. – 2019. – Vol. 8, No. 5 Special Issue 3. – P. 289-291. – DOI 10.35940/ijeat.E1064.0785S319. – EDN NJDAWF.
4. Çeven, S. Implementation of hardware-in-the-loop based platform for real-time battery state of charge estimation on li-ion batteries of electric vehicles using multilayer perceptron / S. Çeven, R. Bayır // *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*. – 2020. – Vol. 8, No. 4. – P. 195-205. – DOI 10.18201/ijisae.2020466313. – EDN CYXKTT.
5. Patil M. S., Seo J.-H., Panchal S., Jee S. [et al.]. Investigation on thermal performance of water-cooled Li-ion pouch cell and pack at high discharge rate with U-turn type microchannel cold plate // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. Vol. 155. Article number: 119728. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119728>.
6. Muñoz P. M., Humana R. M., Falagüerra T., Correa G. Parameter optimization of an electrochemical and thermal model for a lithium-ion commercial battery // *Journal of Energy Storage*. 2020. Vol. 32. Article number: 101803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101803>.
7. Сафин А.Р., Хуснутдинов Р.Р., Копылов А.М. и др. Разработка метода топологической оптимизации электрических машин на основе генетического алгоритма // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. – 2018. – № 4(40). – С. 77-85. – EDN WKEPUG.
8. Разработка макета мобильной установки заряда электротранспорта и стенда для проведения испытаний / А. Р. Сафин, А. Н. Цветков, Т. И. Петров [и др.] // *Естественные и технические науки*. – 2023. – № 7(182). – С. 138-145. – DOI 10.25633/ETN.2023.07.09. – EDN NZWEGG.
9. Khanchandani K.B., Силовая электроника / K.B. Khanchandani // ISBN: 978-0-07-058389-7 – С. 908-959.
10. Гуляев И.В. Векторное управление синхронным двигателем с постоянными магнитами / И.В. Гуляев, А.В. Волков, А.А. Попов и др. // *Научно-технический вестник Поволжья*. – 2015. – № 5. – С. 187-191.

11. Гуляев И.В. Работа асинхронизированного вентильного двигателя с потреблением чисто активной мощности со стороны якоря/ Тутаев Г.М., Юшков И.С., Волков А.В. // Актуальные проблемы электронного приборостроения труды XII международной конференции: АПЭП-2014. 2014. С. 241-244.
12. Ван Л. Прямое управление моментом для СДПМ / Л. Ван, Ю. Гао // Труды IEEE International Электрические машины и приводы конференция IEMDC. – 2007.– С. 403-406.
13. Гуляев И.В. Электропривод на базе асинхронизированного вентильного двигателя / И.В. Гуляев, А.В. Волков, А.А. Попов и др. // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 1. – С. 70-73.
14. Development of an algorithm for the operation of a control station for a mobile electric vehicle charge unit . / A. R. Safin, A. N. Tsvetkov, E. I. Gracheva, T. I. Petrov // Вестник ПИТТУ имени академика М.С. Осими. – 2022. – No. 4(25). – Р. 37-44. – EDN FLAYJK.
15. Петров Т.И., Сафин А.Р. Разработка и реализация стенда для подтверждения эффективности топологической оптимизации ротора синхронных двигателей с постоянными магнитами // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2021. – Т. 13, № 2(50). – С. 100-108. – EDN YRAJUO.
16. Развитие технологии мобильных зарядных станций для электромобилей / А. Р. Сафин, И. В. Ившин, А. Н. Цветков [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 5. – С. 100-114. – DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-5-100-114. – EDN YIGCHN.
17. Моделирование работы оборудования мобильной зарядной установки для заряда электротранспорта с целью подтверждения соответствия группам климатического и механического исполнения / Т. И. Петров, А. Р. Сафин, Е. И. Грачева [и др.] // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 365-377. – DOI 10.21443/1560-9278-2022-25-4-365-377. – EDN JILKEG.
18. Firago B. I., Vasil'ev D. S. (2016) Vector Systems Control of Electrical Drives. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 159 (in Russian).
19. Сафин, А. Р. Оптимизация модели синхронного двигателя с постоянными магнитами для снижения времени расчета вращающего момента / А. Р. Сафин, Т. И. Петров // Вестник ПИТТУ имени академика М.С. Осими. – 2021. – № 3(20). – С. 31-37. – EDN TBKBRC.
20. Сафин А.Р., Петров Т.И., Копылов А.М. и др. Метод проектирования и топологической оптимизации роторов синхронных двигателей с постоянными магнитами // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2020. – Т. 12, № 2(46). – С. 45-53. – EDN EUUONN.
21. Laser Control and Measuring Complex for Non-contact Vibration Control of the Power Transformer Technical Condition / V. Basenko, O. Vladimirov, I. Ivshin [et al.] // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2022. – Vol. 190. – P. 157-167. – DOI 10.1007/978-3-030-86047-9_17. – EDN EIGGGZ.
22. 3D модель силового трансформатора для исследования его технического состояния по вибрационным параметрам / В. Р. Басенко, М. Ф. Низамиев, И. В. Ившин, О. В. Владимирова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 130-143. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-3-130-143. – EDN TTLTLL.

Авторы публикации

Басенко Василий Романович – преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета, e-mail: vasilybas123@mail.ru.

Цветков Алексей Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета, *e-mail*: tsvetkov9@mail.ru.

Петров Тимур Игоревич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета, *e-mail*: tobac15@mail.ru.

Ибрагимова Айгуль Равиловна – аспирант кафедры «Инженерная экология и безопасность труда» Казанского государственного энергетического университета, *e-mail*: ibragimovaaigulrpn@yandex.ru.

Рахмаев Руслан Наилевич – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета, *e-mail*: rahmairuslan@yandex.ru.

1. Alipour M., Esen E., Kizilel R. Investigation of 3-D multi-layer approach in predicting the thermal behavior of 20 Ah Li-ion cells // *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 153. P. 620–632. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.020>.

2. Safin, A. R. Thermal model of a linear electric machine / A. R. Safin, I. V. Ivshin, T. I. Petrov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Scientific Electric Power Conference 2019, ISEPC 2019, Saint Petersburg, May 23–24, 2019 year*. Vol. 643. – Saint Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012014.

3. Tsvetkov A.N., Safin A.R., Ivshin I.V. [et al.] Adaptive control system of the pumping unit // *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. – 2019. – Vol. 8, No. 5 Special Issue 3. – P. 289-291. – DOI 10.35940/ijeat.E1064.0785S319. – EDN NJDAWF.

4. Çeven, S. Implementation of hardware-in-the-loop based platform for real-time battery state of charge estimation on li-ion batteries of electric vehicles using multilayer perceptron / S. Çeven, R. Bayır // *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*. – 2020. – Vol. 8, No. 4. – P. 195-205. – DOI 10.18201/ijisae.2020466313. – EDN CYXKTT.

5. Patil M. S., Seo J.-H., Panchal S., Jee S. [et al.]. Investigation on thermal performance of water-cooled Li-ion pouch cell and pack at high discharge rate with U-turn type microchannel cold plate // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. Vol. 155. Article number: 119728. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119728>.

6. Munoz P. M., Humana R. M., Falagüerra T., Corey G. Parameter optimization of an electrochemical and thermal model for a lithium-ion commercial battery // *Journal of Energy Storage*. 2020. Vol. 32. Article number: 101803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101803>

7. Safin A.R., Khusnutdinov R.R., Kopylov A.M. et al. Development of a method for topological optimization of electric machines based on a genetic algorithm // *Bulletin of the Kazan State Energy University*. – 2018. – № 4(40). – Pp. 77-85. – EDN WKEPUG.

8. Development of a layout for a mobile electric vehicle charging unit and a test stand / A. R. Safin, A. N. Tsvetkov, T. I. Petrov [et al.] // *Natural and technical Sciences*. – 2023. – № 7(182). – Pp. 138-145. – DOI 10.25633/ETN.2023.07.09. – EDN NZWEGG.

9. Khanchandani K.B., Power electronics / K.V. Khanchandani // ISBN: 978-0-07-058389-7 – pp. 908-959.

10. Gulyaev I.V. The operation of an asynchronized brushless motor with the consumption of purely a10. Gulyaev I.V. Vector control of a synchronous motor with permanent magnets / I.V. Gulyaev, A.V. Volkov, A.A. Popov, etc. // *Scientific and technical Bulletin of the Volga region*. – 2015. – No. 5. – pp. 187-191.

11. Gulyaev I.V. Operation of an asynchronous valve motor with consumption of purely active power from the armature/ Tutaev G.M., Yushkov I.S., Volkov A.V. // *Actual problems of electronic instrumentation proceedings of the XII International conference: APEP-2014*. 2014.

pp. 241-244.

12. Wang L. Direct torque control for SDPM / L. Wang, Yu. Gao // Proceedings of IEEE International Electric Machines and Drives conference IEMDC. – 2007. – pp. 403-406.

13. Gulyaev I.V. Electric drive based on an asynchronous valve motor / I.V. Gulyaev, A.V. Volkov, A.A. Popov et al. // Scientific and Technical Bulletin of the Volga region. - 2015. – No. 1. – pp. 70-73.

14. Development of an algorithm for the operation of a control station for a mobile electric vehicle charge unit. / A. R. Safin, A. N. Tsvetkov, E. I. Gracheva, T. I. Petrov // Bulletin of the PITTU named after academician M.S. Osimi. – 2022. – No. 4(25). – P. 37-44. – EDN FLAYJK. 15. Petrov T.I., Safin A.R. Development and implementation of a stand to confirm the effectiveness of topological optimization of the rotor of synchronous motors with permanent magnets // Bulletin of the Kazan State Power Engineering University. - 2021. – Vol. 13, No. 2(50). – pp. 100-108. – EDN YRAJUO.

16. The development of technology of mobile charging stations for electric vehicles / A. R. Safin, I. V. Ivshin, A. N. Tsvetkov [et al.] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Energy problems. - 2021. – Vol. 23, No. 5. – pp. 100-114. – DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-5-100-114. – EDN YIGCHH.

17. Modeling the operation of the equipment of a mobile charging installation for charging electric vehicles in order to confirm compliance with groups of climatic and mechanical design / T. I. Petrov, A. R. Safin, E. I. Gracheva [et al.] // Vestnik MGTU. Proceedings of the Murmansk State Technical University. - 2022. – Vol. 25, No. 4. – pp. 365-377. – DOI 10.21443/1560-9278-2022-25-4-365-377. – EDN JILKEG.

18. Firago B. I., Vasil'ev D. S. (2016) Vector Systems Control of Electrical Drives. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 159 (in Russian).

19. Safin, A. R. Optimization of a synchronous motor model with permanent magnets to reduce the calculation time of torque / A. R. Safin, T. I. Petrov // Bulletin of the PITTU named after academician M.S. Osimi. – 2021. – № 3(20). – Pp. 31-37. – EDN TBKBRC.

20. Safin A.R., Petrov T.I., Kopylov A.M. et al. The method of designing and topological optimization of rotors of synchronous motors with permanent magnets // Bulletin of the Kazan State Power Engineering University. - 2020. – vol. 12, No. 2(46). – pp. 45-53. – EDN EUUONN.

21. Laser Control and Measuring Complex for Non-contact Vibration Control of the Power Transformer Technical Condition / V. Basenko, O. Vladimirov, I. Ivshin [et al.] // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2022. – Vol. 190. – P. 157-167. – DOI 10.1007/978-3-030-86047-9_17. – EDN EIGGGZ.

22. 3D model of a power transformer for the study of its technical condition according to vibration parameters / V. R. Basenko, M. F. Nizamiev, I. V. Ivshin, O. V. Vladimirov // Izvestia of higher educational institutions. Energy problems. - 2022. – Vol. 24, No. 3. – pp. 130-143. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-3-130-143. – EDN TTLTLL.

Authors of the publication

Vasily R. Basenko – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia, *e-mail:* vasilybas123@mail.ru.

Alexei N. Tsvetkov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia, *e-mail:* tsvetkov9@mail.ru.

Timur I. Petrov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia, *e-mail:* tobac15@mail.ru

Aigul R. Ibragimova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia, *e-mail:* ibragimovaigulrpn@yandex.ru.

Ruslan N. Rahmaev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia, e-mail: rahmairuslan@yandex.ru.

Шифр научной специальности: 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы

Получено **05.05.2024 г.**

Отредактировано **25.09.2024 г.**

Принято **10.10.2024 г.**