УДК 621.316.12
DOI: 10.53015/18159958_2025_21_1_3

ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА В АВТОНОМНОМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ: ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

PROSPECTS FOR THE INTRODUCTION OF DC SYSTEMS IN AUTONOMOUS POWER SUPPLY: PRACTICAL ASPECTS

©2025

Зацепина Виолетта Иосифовна[1], доктор технических наук, профессор кафедры электрооборудования
Кудрявцев Артем Евгеньевич, аспирант кафедры электрооборудования
Zatsepina Violetta Iosifovna[1], **Doctor of Technical Sciences, Professor of Electrical Equipment Department**
Kudryavtsev Artem Evgenievich, postgraduate student of the Department of Electrical Equipment

Липецкий государственный технический университет, Липецк (Россия)
Lipetsk State Technical University, Lipetsk (Russia)

E-mail: vizatsepina@yandex.ru [1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8347-4479
E-mail: tembich001@mail.ru

Аннотация: В условиях активного развития возобновляемой энергетики возрастает интерес к гибридным системам электроснабжения, сочетающим централизованные сети переменного тока (AC) и автономные источники постоянного тока (DC). В данной статье исследуется эффективность применения DC-систем для бытового сектора, анализируются их преимущества и технические особенности. На конкретном примере демонстрируется возможность создания энергоэффективной инфраструктуры на базе солнечных панелей и аккумуляторных батарей с минимальными потерями при преобразовании энергии. Целью данной работы является представление комплексного подхода, сочетающего разработку методики расчета автономной системы и оценку параметров практической реализации для современных жилых комплексов. Детально рассматриваются вопросы физического принципа работы DC-систем в сравнении с традиционными AC-решениями, поэтапной методики расчета всех компонентов системы. На основе математического моделирования и сравнительного анализа AC/DC систем доказано, что решение на основе системы постоянного тока обеспечивает более высокий КПД и снижает энергетические потери. В работе рассчитана оптимальная конфигурация автономной DC-системы с требуемым количеством необходимого оборудования. Также проведен сравнительный анализ, который выявил срок окупаемости энергетической структуры в зависимости от тарифной политики и государственных субсидий. Особое внимание уделено практическим аспектам: детализирована методика подбора оборудования, приведены стоимостные параметры.

Ключевые слова: гибридные энергосистемы, возобновляемые источники энергии, фотоэлектрические преобразователи, накопители энергии, умный дом.

Для цитирования: Зацепина, В.И. Перспективы внедрения систем постоянного тока в автономном электроснабжении: практические аспекты / В.И. Зацепина, А.Е. Кудрявцев // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2025. – Т. 21, № 1 (77). – С. 3-11. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_1_3.

Abstract: In the context of the active development of renewable energy, there is an increasing interest in hybrid power supply systems combining centralized alternating current (AC) networks and autonomous direct current (DC) sources. This article examines the effectiveness of DC systems for the domestic sector, analyzes their advantages and technical features. A concrete example demonstrates the possibility of creating an energy-efficient infrastructure based on solar panels and rechargeable batteries with minimal losses during energy conversion. The purpose of this work is to present an integrated approach combining the development of an autonomous system calculation methodology and an assessment of the practical implementation parameters for modern residential complexes. The issues of the physical principle of operation of DC systems in comparison with traditional AC solutions and the step–by-step calculation methodology of all system components are considered in detail. Based on mathematical modeling and comparative analysis of AC/DC systems, it has been proven that a DC-based solution provides higher efficiency and reduces energy losses. The optimal configuration of an autonomous DS system with the required amount of necessary equipment is calculated. A comparative analysis was also carried out, which revealed the payback period of the energy structure depending on tariff policy and government subsidies. Special attention is paid to practical aspects: the methodology of equipment selection is detailed, cost parameters are given.

Keywords: hybrid energy systems, renewable energy sources, photovoltaic converters, energy storage, smart home.

For citation: Zatsepina,V.I. Prospects for the introduction of DC systems in autonomous power supply: practical aspects / V.I. Zatsepina, A.E. Kudryavtsev // Vesti of Higher Educational Institutions of the Chernozem region. – 2025. – Vol. 21, № 1 (77). – P. 3-11. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_1_3.

ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции в энергетике ориентированы на децентрализацию, экологичность и повышение энергоэффективности. Традиционные системы переменного тока (АС), несмотря на повсеместное распространение, демонстрируют ряд существенных недостатков при интеграции с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ): значительные потери при преобразовании (до 20–25 %), зависимость от централизованных сетей, низкий КПД устройств с встроенными блоками питания. В этом контексте автономные системы постоянного тока (DC), совместимые с солнечными панелями и современными накопителями энергии, представляют собой перспективную альтернативу, обеспечивая более высокую эффективность, непрерывное энергоснабжение, снижение затрат на преобразование энергии, надежность и упрощенную архитектуру энергосистемы.

В качестве социально-экологических аспектов можно выделить повышение осведомленности потребителей об экологических проблемах, стремление к энергетической независимости, а также развитие концепции «умного дома». Эти факторы создают уникальное окно возможностей для внедрения автономных DC-систем, которые особенно эффективны для частных домов в сельской местности, дачных поселков, удаленных объектов инфраструктуры, аварийных систем электроснабжения.

Целью данной работы является практическая оценка параметров и эффективности автономной системы электроснабжения на постоянном токе для частного дома, расчет оптимальной конфигурации оборудования.

Основными задачами исследования являются сравнительный анализ АС и DC систем по ключевым параметрам:

1. КПД, энергопотери, срок службы оборудования.

2. Разработка методики расчета энергопотребления, мощности фотоэлектрической системы и емкости аккумуляторов для типового домохозяйства.

3. Расчет необходимых вложений и текущих расходов на содержание системы.

4. Определение практических рекомендаций по внедрению DC-решений, включая оптимальный набор оборудования и условия его эксплуатации.

Актуальность исследования обусловлена рядом факторов: ежегодным ростом тарифов на электроэнергию (7–10 % в РФ), снижением стоимости солнечных панелей (на 80 % за последнее десятилетие), развитием технологий накопления энергии (LiFePO4 аккумуляторы) и ужесточением экологических норм. Кроме того, современные тенденции, такие как распространение энергоэффективных DC-устройств (LED-освещение, бытовая техника с DC-питанием) и развитие концепции «умного дома», создают благоприятные условия для внедрения автономных систем на постоянном токе.

Проведенный анализ направлен на решение ключевых проблем, связанных с переходом на DC-системы: высокой начальной стоимостью оборудования, необходимостью точного расчета параметров системы и оценкой технической целесообразности. Результаты работы могут быть использованы для проектирования энергоэффективных решений в частном секторе.

ТЕОРИЯ ВОПРОСА

Основу автономной системы электроснабжения составляют три ключевых компонента: генерация, накопление и потребление энергии. В случае использования солнечной энергии, генерация осуществляется посредством фотоэлектрических панелей, которые преобразуют солнечное излучение в электричество постоянного тока. Современные солнечные панели обладают КПД в диапазоне 18–22 %, а их срок службы превышает 25 лет при сохранении 80 % первоначальной мощности. Накопительная часть системы строится на основе современных литий-железофосфатных (LiFePO4) аккумуляторов, которые обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными свинцово-кислотными: большей глубиной разряда (80 % против 50 %), увеличенным сроком службы (3000–5000 циклов против 500–1000) и более высокой энергетической плотностью [1]. Затраты на создание автономной системы электроснабжения складываются из нескольких основных статей. Наибольшую долю (около 40–50 %) составляют затраты на фотоэлектрические панели. Стоимость современных солнечных модулей варьируется в пределах 30–50 рублей за Вт установленной мощности. Второй по значимости статьей расходов являются аккумуляторы (30–40 % от общей стоимости). Остальные компоненты системы (контроллер заряда, инвертор, монтажные конструкции, кабельная продукция) занимают оставшиеся 20–30 % бюджета. К эксплуатационным расходам относятся периодические замены аккумуляторов (каждые 7–10 лет в зависимости от типа) [2]. Также важно менять инвертор (10–15 лет), проводить ежегодное техническое обслуживание, а именно проверять соединения, очищать панели. Для типового домохозяйства в средней полосе России срок окупаемости автономной системы мощностью 3 кВт составляет 10–12 лет [3]. Однако при учете ежегодного роста тарифов на электроэнергию (в среднем 7 % в год) этот показатель может сократиться до 7–8 лет. Особый интерес представляет возможность создания гибридных систем, сочетающих преимущества централизованного энергоснабжения и автономных решений. Такие системы позволяют не только обеспечить энергетическую независимость, но и при наличии избыточной генерации возвращать энергию в общую сеть, создавая дополнительный источник дохода для домохозяйства.

Физические преимущества систем постоянного тока коренятся в самой природе современных источников энергии и потребителей. Фотоэлектрические панели, являющиеся основой автономных систем, изначально генерируют постоянное напряже-

ние. Аналогично, большинство современных электронных устройств светодиодного освещения и бытовой техники в конечном итоге используют постоянный ток для своей работы. Традиционная схема преобразования DC-AC-DC, применяемая в классических системах, приводит к потерям на каждом этапе преобразования, которые в сумме могут достигать 20–25 % от общей вырабатываемой энергии.

С точки зрения электротехники, системы постоянного тока обладают несколькими фундаментальными преимуществами. Во-первых, они исключают потери на реактивную мощность, неизбежные в цепях переменного тока. Во-вторых, отсутствие необходимости синхронизации частоты значительно упрощает архитектуру энергосистемы. В-третьих, постоянный ток не вызывает скин-эффекта в проводниках, что позволяет более эффективно использовать сечение кабелей. Особенно важным это становится в низковольтных системах, где потери в проводах традиционно высоки [4]. В работе проводится техническое обоснование перехода на системы постоянного тока с акцентом на коэффициент полезного действия передачи энергии, упрощение архитектуры, а также разрабатывается практическая модель реализации с подробным расчетом оборудования с требуемыми характеристиками, оценкой энергопотребления.

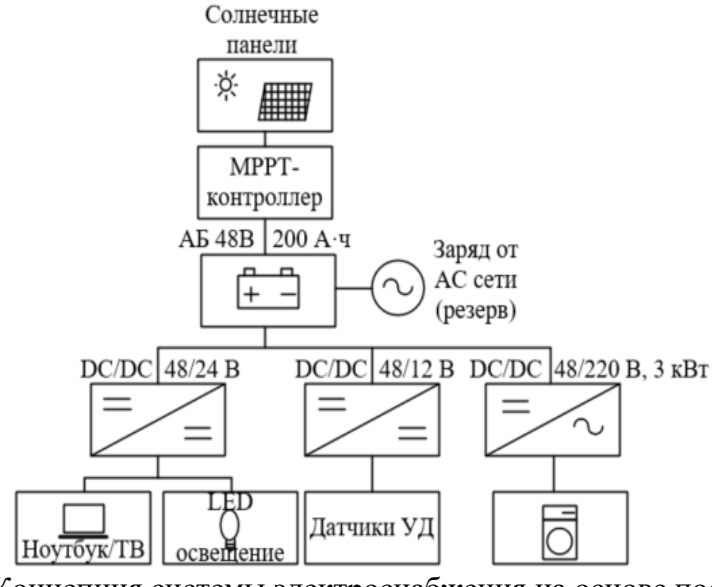


Рис. 1. Концепция системы электроснабжения на основе постоянного тока
Fig. 1. The concept of a DC-based power supply system

ТЕХНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основой для проектирования автономной энергосистемы служит точный расчет суточного энергопотребления. Для типового домохозяйства с определенным набором оборудования требуется определить энергопотребление за сутки с помощью формулы:

$$E_{сут} = \sum (P_i \cdot t_i), \qquad (1)$$

где P_i – мощность i-го прибора, t_i – время работы i-го прибора [5].

Типовой набор электрооборудования с временем работы в течение дня и потребляемой мощностью представлен в табл. 1. К прочим приборам можно отнести различные датчики, электрические инструменты. Данная конфигурация может дополняться, а также масштабироваться в зависимости от нужд потребителей. Необходимая мощность может быть увеличена за счет расширения системы источниками генерации постоянного тока, а также может быть предусмотрена резервная сеть традиционного типа [6].

Таблица 1

Энергопотребление типового набора электрооборудования

Table 1

Energy consumption of a typical set of electrical equipment

Электрооборудование	Кол-во, шт	P, Вт	t, ч	$E_{сут}$, Вт·ч
LED освещение	5	10	5	250
Ноутбук	1	60	8	480
Холодильник DC	1	100	24	2400
Прочие приборы	1	100	5	500
Итог:				3630

Далее необходимо рассчитать мощность фотоэлектрической системы согласно формуле:

$$P_{pv} = (E_{сут} \cdot 1,3) / (H_{пик} \cdot \eta), \quad (2)$$

где 1,3 – коэффициент запаса, $H_{пик}$ – среднесуточные пиковые часы инсоляции (для Москвы 2,8 ч/сутки), η – КПД системы (0,75) [7]. Согласно данному расчету полученная мощность фотоэлектрической системы составляет 2,25 кВт. Далее требуется посчитать необходимую емкость аккумуляторов, которые будут поддерживать беспрерывную и автономную работу аппаратов по формуле:

$$C_{бат} = (E_{сут} \cdot n) / (U_{сист} \cdot DOD \cdot \eta_{инв}), \quad (3)$$

где n – дни автономии (2 суток), $U_{сист}$ – напряжение системы, в данной работе рассматривается вариант 48 В, DOD – глубина разряда, 0,8, $\eta_{инв}$ – КПД инвертора (0,95). Таким образом, при расчете получается, что емкость аккумуляторов должна составлять 200 А·ч.

После определения требуемого количества фотоэлектрических панелей, их мощности и необходимой емкости аккумуляторных батарей нужно рассчитать эксплуатационные расходы. Капитальные затраты на выбранное оборудование включают несколько составляющих. Стоимость фотоэлектрических элементов зависит от мощности, а также от среднерыночной цены поликристаллических панелей российского или азиатского производства, которая равняется 45 руб/Вт (например, Hevel, RZMP, Jinko Solar) [8]. Рассматриваемый проект будет состоять из 6 панелей по 375 Вт. Стоимость бюджетных LiFePO4 батарей (например, Pylontech, Eve) равняется 120 руб/А·ч. В качестве сравнения: свинцовые АКБ стоят 60–80 руб/А·ч, но служат 3–5 лет, когда рассматриваемые LiFePO4 10 и более лет [9]. Среди необходимого оборудования, которое также требуется включить в стоимость, следует рассмотреть и учесть контроллер заряда MPPT (20000–30000 руб.), например Victron SmartSolar 150/35 [10]. Инвертор 48В → 220В (15000–20000 руб.) – например, МАР «Энергия» 3 кВт. Монтажные конструкции, кабели, защита (5000–10000 руб.). Итоговые капитальные затраты отражены в табл. 2.

Также определенную часть составляют эксплуатационные расходы. К обслуживанию системы можно отнести чистку панелей (в среднем 2 раза в год, но при определенных погодных условиях возможно больше), что примерно составит около 2000 руб. А также диагностика электроники (раз в год) стоимостью 3000 руб. Замена аккумуляторных батарей LiFePO4 каждые 7 лет, стоимостью 24000 руб., но с учетом затрат на год, будет составлять около 3429 руб.

Итоговые затраты на эксплуатационные расходы будут составлять 8429 руб. [11]. Экономия и срок окупаемости также представляют очень важную составляющую проекта. Так, годовая выработка электрической энергии для Москвы при 2,8 пикочасах инсоляции и КПД в районе 75 % будет равняться 1,325 кВт·ч. При тарифе 5,5 руб/кВт·ч (средний тариф для частных домов в РФ) экономия составит 7288 руб. в год.

Таблица 2

Итоговые затраты на оборудование

Table 2

Total equipment costs

Оборудование	Цена, руб.
Солнечные панели	101,250
Аккумуляторы	24000
Контроллер заряда	20000
Инвертор	20000
Монтажные конструкции, кабели, защита	10000
Итог	175250

Теперь следует рассчитать срок окупаемости. Чистая прибыль вычисляется как разница между экономией и расходами и составит 1141 руб/год (в убыток). Это связано с тем, что система не окупается без субсидий или роста тарифов. При размере субсидий в 50 % капитальные затраты снижаются до 87625 руб., срок окупаемости будут составлять 12 лет. При росте тарифов на 7 % ежегодно экономия через 5 лет составит около 10200 руб/год, срок окупаемости в таком случае сокращается до 7–8 лет.

Далее сравним AC и DC системы по нескольким критериям, среди которых коэффициент полезного действия, экономия энергии, потери на 1 кВт·ч, срок службы. Так, в AC системе потери в выпрямителе достигают 8 %, в инверторе 15 %, в DC системе потери в преобразователе составляют 5 %. В связи с тем, что в системах на постоянном токе отсутствуют инверторы, и компоненты нагреваются меньше, их срок службы значительно дольше. Результаты сравнения сведены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение AC/DC систем

Table 3

Comparison of AC/DC systems

Критерии	AC	DC
КПД, %	78,2	95
Экономия энергии, %	–	21,5
Потери на 1 кВт·ч	218	50

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенное исследование автономной DC-системы мощностью 2.25 кВт позволило получить комплекс практических результатов, требующих детального анализа. Расчеты энергопотребления показали, что для типового домохозяйства с суточным потреблением 3,63 кВт·ч оптимальная конфигурация системы включает: 6 солнечных панелей по 375 Вт (2,25 кВт суммарно), аккумуляторный банк 200 А·ч при 48 В и MPPT-контроллер и инвертор 3 кВт. КПД системы достиг 95 % против 78,2 % у AC-аналогов. Потери сокращены с 218 Вт·ч до 50 Вт·ч на 1 кВт·ч (снижение потерь на 168 Вт·ч с каждого кВт·ч). Прямое питание DC-нагрузок исключило дополнительные преобразования. По надежности результаты также показывают, что автономность достигает 2 суток при глубине разряда 80 %, стабильность напряжения около 2 %, позволяя обеспечивать электроэнергией приборы в моменты перерывов электроснабжения в AC сети. А упрощенная архитектура снизила количество точек отказа.

ВЫВОДЫ

Проведённое исследование достигло поставленной цели по практической оценке параметров и эффективности автономной системы электроснабжения на постоянном токе. В результате работы был выполнен сравнительный анализ AC и DC систем, подтвердивший существенные преимущества решений на постоянном токе: КПД 95 % (против 78 % у AC), снижение энергопотерь на 77 % и увеличенный срок службы оборудования.

Разработана методика расчёта энергосистемы для типового домохозяйства с потреблением 3,63 кВт·ч/сутки, показавшая необходимость установки: фотоэлектрических модулей мощностью аккумуляторного банка, MPPT-контроллера и сопутствующего оборудования. Проведён расчет необходимых вложений, выявивший: капитальные затраты, срок окупаемости в зависимости от сценария, критическую важность мер господдержки. Также были определены практические рекомендации по внедрению: приоритетное использование DC-нагрузок, оптимальные параметры оборудования, перспективы гибридных решений.

Полученные результаты подтверждают техническую реализуемость и перспективность DC-систем, особенно для объектов с преобладанием постоянной нагрузки. Технологические тенденции указывают на перспективность решения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования имеют широкую область практического применения. Наиболее перспективными направлениями внедрения представляются: частные домохозяйства в сельской местности и удалённых районах с нестабильным энергоснабжением; дачные посёлки и коттеджные городки; аварийные системы электроснабжения критически важных объектов; мобильные и временные сооружения (кемпинги, исследовательские станции); а также пилотные проекты «умных» экопоселений. Технологический прогресс в области возобновляемой энергетики и ожидаемый рост тарифов на традиционную электроэнергию создают благоприятные условия для постепенного внедрения DC-систем. Полученные результаты могут быть использованы не только при проектировании автономных энергокомплексов, но и при разработке нормативной базы, образовательных программ и мер государственной поддержки в области распределённой энергетики. Дальнейшие исследования в этом направлении могли бы сосредоточиться на оптимизации гибридных AC/DC решений и разработке стандартов для DC-электросетей бытового назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудрявцев А.Е., Зацепина В.И. Имитационное исследование рабочих характеристик микросети постоянного тока // Цифровая трансформация в энергетике : материалы Четвертой Международной научной конференции, Тамбов, 21 дек. 2022 г. Тамбов, 2023. С. 107-109.

2. Кудрявцев А.Е. Концепция управления питанием для microgrid постоянного тока // Материалы областного профильного семинара «Школа молодых ученых» по проблемам технических наук : тезисы и доклады семинара. Липецк, 2022. С. 161-162.

3. Кудрявцев А., Павлов И., Зацепина В. Интеграция системы электроснабжения на основе постоянного тока в жилые помещения // Международная конференция по промышленному проектированию, применению и производству (ICIEAM), Сочи, 19-25 мая 2024 г. С. 97-101.

4. Романцов М.М., Логачева А.Г. Преимущества замены накопителей энергии в системах оперативного постоянного тока // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве : материалы VI Национальной научно-практической конференции, Казань, 10-11 декабря 2020 г. В 2 т. Т. 1. Казань, 2020. С. 387-389.

5. Атрашенко О.С. Перспективы создания системы электроснабжения постоянно-

го тока для автономного электроснабжения // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2019. № 1 (26). С. 19-23.

6. Лебедев М.В. Сети постоянного тока с применением явления сверхпроводимости как часть энергосистем – перспективы и развитие // Комплексные исследования в рыбохозяйственной отрасли : материалы IX Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Владивосток, 24 ноября 2023 г. Владивосток, 2024. С. 308-314.

7. Джендубаев Э.А.З., Джендубаев А.З.Р. Постоянный ток как основа электроэнергетики будущего // Электроэнергетика глазами молодежи – 2017 : материалы VIII Международной научно-технической конференции, Самара, 2-6 октября 2017 г. В 3 т. Т 1. Самара, 2017. С. 239-242.

8. Климов П.Л., Доденгефт Е.А. Моделирование управления преобразователем в системе типа "сеть постоянного тока - сеть переменного тока // Форум молодых ученых. 2019. № 2 (30). С. 776-780.

9. Змиева К.А. Моделирование сети электроснабжения промышленного предприятия с использованием постоянного тока // Электротехника. 2015. № 5. С. 2-9.

10. Тигин В.М. Возможности применения сетей постоянного тока для электроснабжения потребителей // Актуальные проблемы развития современной науки и образования : сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции, Москва, 15 апреля 2015 г. В 5 ч. Ч. 3. Москва, 2015. С. 129-130.

11. Осипов В.А., Логунова П.А. Определение метрологической неопределенности величины потерь энергии в тяговой сети постоянного тока // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2020. № 4 (80). С. 139-144.

REFERENCES

1. Kudryavtsev A.E., Zatsepina V.I. imulation study of operational characteristics of a DC microgrid // Digital transformation in the energy industry: materials of the Fourth International Scientific Conference, Tambov, 21 December 2022. Tambov, 2023. P. 107-109.

2. Kudryavtsev A.E. The concept of power management for a constant current microgrid // Materials of the regional profile seminar "School of young scientists" on the problems of technical sciences: topics and reports of the seminar. Lipetsk, 2022. P. 161-162.

3. Kudryavtsev A., Pavlov I., Zatsepina V. Integration of a DC-based electrical supply system into residential premises // International Conference on Industrial Design, Application and Production (ICIEAM), Sochi, 19-25 May 2024. Sochi, 2024. P. 97-101.

4. Romantsov M.M., Logacheva A.G. Advantages of replacing energy storage in operational DC systems // Instrumentation and automated electric drive in the fuel and energy complex and housing and communal services : Proceedings of the VI National Scientific and Practical Conference, Kazan, 10-11 December 2020. Vol. 1. Kazan, 2020. P. 387-389.

5. Atrashenko O.S. Prospects of building a DC power supply system for autonomous power supply // Energy and resource conservation: industry and transport. 2019. № 1 (26). P. 19-23.

6. Lebedev M.V. DC networks using the phenomenon of superconductivity as part of power systems - prospects and development // Integrated research in the fisheries industry : Materials of the IX International Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists, Vladivostok, 24 November 2023. Vladivostok, 2024. P. 308-314.

7. Jendubaev E.A.Z., Jendubaev A.Z.R. Direct current as the basis of the electric power industry of the future // Electric power industry through the eyes of youth – 2017 : Proceedings of the VIII International Scientific and Technical Conference, Samara, 2-6 October 2017. Vol. 1. Samara, 2017. P. 239-242.

8. Klimov P.L., Dodengeft E.A. Modeling of transformer control in a system such as "DC network - alternating current network" // Forum of Young Scientists. 2019. № 2 (30). P. 776-780.

9. Zmieva K.A. Modeling of an industrial power supply network using direct current / K.A. Zmieva // Electrical engineering. 2015.

№ 5. P. 2-9.

10. Tigin V.M. The possibilities of using DC networks for power supply to consumers // Actual problems of the deve-lopment of modern science and education : A collection of scientific papers based on the materials of the International Scientific and Practical Conference, Moscow, 15 April 2015. In 5 p. Vol 3. Moscow, 2015. P. 129-130.

11. Osipov V.A., Logunova P.A. Determination of the metrological uncertainty of the amount of energy loss in a constant current traction network // Bulletin of the Rostov State University of Railways. 2020. № 4 (80). P. 139-144.