



**Брачунова Ульяна Викторовна**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СРЕДСТВ И МЕТОДИК ОЦЕНКИ  
ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕННОСТИ БОРТОВОЙ СЕТИ АВТОМОБИЛЕЙ  
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЯХ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ**

2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «СамГТУ») на кафедре «Теоретическая и общая электротехника».

- Научный руководитель:** **Козловский Владимир Николаевич**  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара, заведующий кафедрой «Теоретическая и общая электротехника»
- Официальные оппоненты:** **Артюхов Иван Иванович**  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», г. Саратов, профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника»  
**Малеев Руслан Алексеевич**  
кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва, профессор кафедры «Электрооборудование и промышленная электроника»
- Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Ульяновский государственный технический университет**», г. Ульяновск

Защита состоится 21 марта 2023 года в 13 ч. на заседании диссертационного совета 24.2.377.06, при ФГБОУВО «СамГТУ» по адресу: г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Самарский государственный технический университет, Главный корпус, ауд. № 200.

С авторефератом и диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «СамГТУ», а также на официальном сайте диссертационного совета по адресу <http://d24237706.samgtu.ru/node/2>.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью) просим направлять по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская 244, Главный корпус, Самарский государственный технический университет, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.06; факс: (846) 278-44-00, e-mail: a-ezhova@yandex.ru.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.2.377.06  
кандидат технических наук,  
доцент



Е.В. Стрижакова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Развитие автомобильной промышленности и автотранспортного комплекса в целом является одной из доминант в экономике России и рассматривается в контексте инновационной политики государства. Одними из приоритетных направлений автомобилестроения в РФ согласно Стратегии развития автомобильной промышленности Российской Федерации на период до 2025 года, утвержденной распоряжением Правительства РФ от 28 апреля 2018 г. № 831-р являются: улучшение энергоэффективности и повышение экологических показателей транспортных средств, гармонизация требований технических регламентов, стандартов и правил с международной практикой; технологии электрификации транспортных средств.

Анализ тенденций развития конструкций современных автомобилей показывает, что в последние десятилетия наиболее существенный рост отмечается в элементной базе бортового электротехнического и электронного комплекса (БЭК).

Современные достижения науки и техники привели к внедрению в структуру бортовой сети автомобиля многочисленных взаимосвязанных электротехнических и электронных компонентов, обеспечивающих безопасность, функциональность, комфорт, эффективность и экологичность. При этом наблюдается рост мощности потребителей электрической энергии бортовой сети. БЭК насыщается электронными компонентами, растет число силовых приводов, исполнительных электромеханизмов, увеличивается протяженность силовой и слаботочной электропроводки. Бортовая сеть автомобилей традиционных конструкций близка к своему пределу по токовым нагрузкам.

В этой связи в автомобильных системах электроснабжения просматриваются тенденции повышения: тока отдачи генератора; уровня номинального напряжения бортовой сети.

С другой стороны анализ данных по дефектам автомобилей в гарантийный и постгарантийный периоды эксплуатации показывает, что более 30% всех отказов приходится на компоненты БЭК. То есть, для поддержания высокого уровня конкурентоспособности автомобилей от предприятия-изготовителя требуется всесторонне подходить к решению проблем качества и надежности продукции именно в сегменте компонентов БЭК.

Требования, предъявляемые к условиям работы БЭК автомобилей достаточно специфичны и касаются вопросов надежности, ресурса работы, технологичности, стоимости, ремонтпригодности и многих других параметров.

Современным автотранспортным средством массового производства, по-прежнему остается автомобиль, имеющий традиционную конструкцию с двигателем внутреннего сгорания. Именно для него, сегодня, довольно остро встает вопрос связанный с энергообеспеченностью бортового электротехнического комплекса при различных режимах эксплуатации.

Соответственно, научно-техническая задача повышения энергообеспеченности БЭК автомобилей, приобретает всё большую актуальность.

**Степень разработанности проблемы.** Основными в области разработки бортовых электротехнических комплексов автомобилей, являются работы отечественных и иностранных ученых: Фесенко М.Н., Румянцева А.Л., Салкина С.С., Опарина И.М., Купеева Ю.А., Глезера Г. Н., Петленко Б.И., Акимова С.В., Банникова С.П., Волкова В.С., Галкина Ю.М., Гируцкого О.И., Чижкова Ю.П., Пузакова А.В., Чернова А.Я., Ютта В.Е., Гармаша Ю.В., Строганова В.И., Козловского В.Н., Fisher R.A., Sghleif F.R., Curdts E.V. и др.

В последние десятилетия, выделенная задача активно разрабатывается лидерами автопрома и производителями компонентов электрооборудования и автоэлектроники, такими как Toyota, Renault, Nissan, GM, Volkswagen, Scania, Volvo, Fiat, Audi, Bosch.

**Цель работы:** совершенствование инструментов оценки энергообеспеченности бортового электротехнического комплекса современных автотранспортных средств при различных уровнях номинального питающего напряжения.

**Решаемые задачи:**

1. Комплексный, всесторонний научно-технический и практический анализ проблемы энергообеспеченности бортовой сети современных автотранспортных средств.

2. Разработка математической модели оценки зарядного баланса современного автомобиля учитывающей изменение уровня питающего напряжения, параметров электрической нагрузки и числа оборотов двигателя;

3. Оценка влияния изменения уровня питающего напряжения бортовой сети автомобиля на электротехнические параметры и характеристики основных и вспомогательных электротехнических систем и электрокомпонентов (ЭС и ЭК);

4. Разработка методики оценки энергообеспеченности бортового электротехнического комплекса современных автомобилей, учитывающей параметры режимов эксплуатации;

5. Апробация предложенных технических решений.

**Объект исследования:** бортовой электротехнический комплекс автотранспортных средств.

**Предмет исследования:** методы, методики и подходы к оценке энергообеспеченности бортового электротехнического комплекса современных автомобилей.

**Методы исследования.** В работе приведены результаты теоретических и расчетно-экспериментальных исследований, полученных с использованием теории линейных и нелинейных электрических цепей, методов математического и имитационного моделирования, теории электрических машин и аппаратов. Исследования были проведены с использованием высокоуровневого языка программирования Python. Результаты и выводы работы теоретически обоснованы и подтверждены расчетами. Обоснованность и достоверность результатов работы определяются корректным применением математических методов исследования.

## **Научная новизна**

1. Разработана математическая модель оценки зарядного баланса бортового электротехнического комплекса автомобиля, отличающаяся возможностью учета изменения уровня питающего напряжения, параметров нагрузки и числа оборотов двигателя.

2. Предложена методика оценки влияния изменения уровня питающего напряжения бортовой сети автомобиля на электротехнические параметры и характеристики основных и вспомогательных электротехнических систем и электрокомпонентов (ЭС и ЭК), отличающаяся систематизацией, обобщением и классификацией ЭС и ЭК по характеру влияния уровня питающего напряжения на электротехнические параметры и характеристики.

3. Разработана методика оценки энергообеспеченности бортового электротехнического комплекса автомобилей, отличающаяся учетом свойств генерации, потребления, заряда аккумуляторной батареи при различных режимах эксплуатации.

## **Практическая значимость диссертационной работы:**

Разработан универсальный прикладной программный инструментальный по количественной оценке энергообеспеченности бортового электротехнического комплекса современных автомобилей.

Представлены практические рекомендации по изменению конструктивных параметров и характеристик основных электротехнических систем и компонентов БЭК современных автомобилей при повышении уровня номинального питающего напряжения бортовой сети.

Предложенные в диссертации научно-технические решения вошли в устойчивую практику ПАО «КАМАЗ» и применяются при планировании и проведении контрольных дорожных испытаний новой автомобильной техники.

## **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Математическая модель оценки зарядного баланса бортового электротехнического комплекса автомобиля при различных уровнях номинального питающего напряжения.

2. Методика оценки влияния изменения уровня питающего напряжения бортовой сети автомобиля на электротехнические параметры и характеристики основных и вспомогательных электротехнических систем и электрокомпонентов.

3. Методика оценки энергообеспеченности бортового электротехнического комплекса автомобилей.

4. Результаты апробации и внедрения предложенных технических решений.

**Научная квалификационная работа на соискание степени кандидата технических наук** выполнена в соответствии с паспортом специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы» и соответствует направлениям исследований: п. 1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем... анализ системных... связей... и компьютерное моделирование электротехнических комплексов и систем...», п. 2 «Разработка научных основ проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов, систем и их компонентов», п. 3 «Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов...».

**Достоверность** полученных результатов обусловлена использованием обоснованных допущений, строгих математических методов, адекватность которых подтверждена результатами теоретических и прикладных исследований, а также обсуждением результатов диссертации на российских и международных конференциях, форумах и семинарах.

#### **Апробация работы**

Результаты работы обсуждались на научно-технических семинарах ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», профильных совещаниях департамента технического контроля ПАО «КАМАЗ».

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях: Conference IEEE of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, (EIConRus 2021), IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 3rd International Scientific-Practical Conference on Quality Management and Reliability of Technical Systems (BRISTOL, 2021); XXX международной научно-практической конференции "Приоритетные направления развития науки и технологий" (Тула, ТулГУ, 2022), III Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (Тула, ТулГУ, 6 – 8 апреля 2022), The International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon 2022).

**Публикации.** По тематике исследований опубликовано 25 работ, в том числе 11 статей в журналах, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ, 2 статьи в изданиях с международным индексом цитирования Scopus, 2 свидетельства о регистрации программы ЭВМ.

**Личный вклад автора в диссертационное исследование.** Постановка задач осуществлялась совместно с научным руководителем. Теоретические и практические исследования автором выполнены самостоятельно. Автором выполнен основной объем исследований, изложенных в диссертации, разработаны: математическая модель оценки зарядного баланса бортового электротехнического комплекса автомобиля при различных уровнях номинального питающего напряжения, методика оценки влияния изменения уровня питающего напряжения бортовой сети автомобиля на основные конструктивные параметры и характеристики электротехнических компонентов и систем, методика оценки энергообеспеченности бортового электротехнического комплекса автомобилей, проанализированы результаты исследования, выполнена подготовка основных публикаций по теме диссертации.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация включает в себя введение, четыре главы, заключение, библиографический список и приложение. Основной текст изложен на 195 страницах, содержит 72 рисунка, 19 таблиц. Библиографический список состоит из 129 наименований и приложений на 27 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, определена цель и поставлены основные задачи, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертации проводится комплексный научно-технический обзор проблемы оценки взаимосвязей и влияния питающего напряжения бортовой сети автомобилей на технико-эксплуатационные характеристики основных электротехнических систем (ЭС) и электрокомпонентов (ЭК). Выделен целый ряд научных работ, в которых решаются задачи направленные на повышение качества, надежности, эффективности компонентов и систем бортового электротехнического комплекса современных автомобилей. При этом решения направленного на совместное рассмотрение вопросов для всех основных ЭС и электрокомпонентов в совокупности, в контексте решения задачи по разработке комплексного инструментария направленного на совершенствование оценки энергообеспеченности БЭК при изменении уровня питающего напряжения не существует.

**Во второй главе** диссертации проводится разработка математической модели зарядного баланса автотранспортного средства (АТС) при различных уровнях напряжения питающей сети. В работе установлена необходимость развития существующих методик оценки зарядного баланса АТС, за счет создания математической модели.

Задача построения математической модели зарядного баланса и энергетической обеспеченности бортовой сети при изменении величины питающего напряжения представляет собой достаточно сложную нелинейную задачу, так как сопряжено с учётом значительного количества факторов, определяющих нелинейность отдельных элементов. К основным нелинейным элементам относятся: характеристики генератора, зависящие как от конструктивных особенностей генератора, так и от оборотов и потребляемого бортовым оборудованием (и аккумуляторной батареей) тока; непостоянство режима работы генератора, определяющаяся плавающей величиной оборотов ротора и меняющимся током бортовой цепи автомобиля; характеристиками аккумуляторной батареи, зависящими от конкретной модели, его состояния (остаточная емкость, срок эксплуатации, параметры химических элементов) и т.д.

Рассмотрение всех параметров возможно при значительном накоплении эмпирически полученной базы учёта работы этих элементов при различных режимах эксплуатации АТС. Известные методы анализа энергообеспеченности автотранспортных средств построены на графо-аналитическом и аналитическом подходах (рисунок 1). Такие подходы ограничивают возможности моделей в плане гибкости и реализации моделирования. В работе предлагается построение модели на основе численных методов, реализованных в среде программирования Python.

Предлагаемое в рамках работы научно-техническое решение использует ряд допущений, не противоречащих законам электротехники и принципам функционирования бортовой сети автомобиля. Тем не менее, дальнейшее развитие модели зарядного баланса предполагает учёт большего количества факторов с

целью повышения полноты получаемых результатов и сохранения актуальности модели при изменяющемся наборе используемых в автотранспортных средствах элементов бортовой сети.

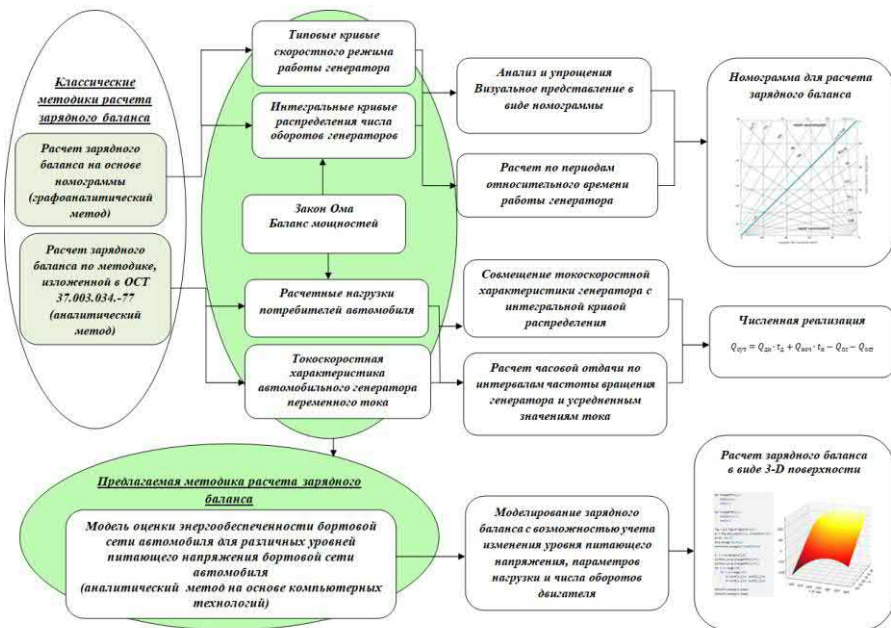


Рисунок 1 – Научная концепция решения задачи модернизации модели оценки энергообеспеченности работы электротехнического комплекса автомобиля

Модель основана на аппроксимации токоскоростной характеристики генератора автотранспортного средства и моделировании потребления сети в виде изменяющейся токовой нагрузки. Так при изменяющихся оборотах двигателя и токе потребления бортовой сети автотранспортного средства поверхность мощности заряда аккумуляторной батареи (АКБ) описывается выражением:

$$P(I, n) = P_{генер}(n) - P_{потр}(I), \quad (1)$$

где  $P$  – мощность заряда АКБ,

$P_{генер}$  – мощность генератора,

$P_{потр}$  – мощность потребителей,

$I$  – сила тока потребления,

$n$  – частота оборотов двигателя внутреннего сгорания.

Для автомобиля Lada Granta поверхность мощности заряда аккумуляторной батареи примет вид, представленный на рисунке 2.

Рассмотрены два варианта аппроксимации – на основе сплайн аппроксимации, дающей точное совпадение с узловыми точками токоскоростной характеристики, и на основе полиномиальной регрессии, позволяющей получить аналитическое выражение аппроксимированной характеристики в виде полинома.



Построенные поверхности демонстрируют, что зарядный баланс автомобиля способен принимать отрицательные значения при малых оборотах двигателя. Анализ режимов работы автотранспортных средств показывает, что поддержание достаточных оборотов двигателя происходит только при движении по трассе. Эксплуатация автомобиля в городе сопряжена со снижением среднего значения оборотов двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Эксплуатация автомобилей в городских условиях сопряжена с необходимостью учета «пробок», значительного числа светофоров и т.д. В зимний и летний периоды потребление мощности увеличивается за счёт использования климатических систем. Полный дозаряд аккумуляторной батареи в режиме городского траффика зачастую не выполняется, что в холодное время года приводит к необратимым процессам в самом АКБ и, как следствие, снижению его ёмкости.

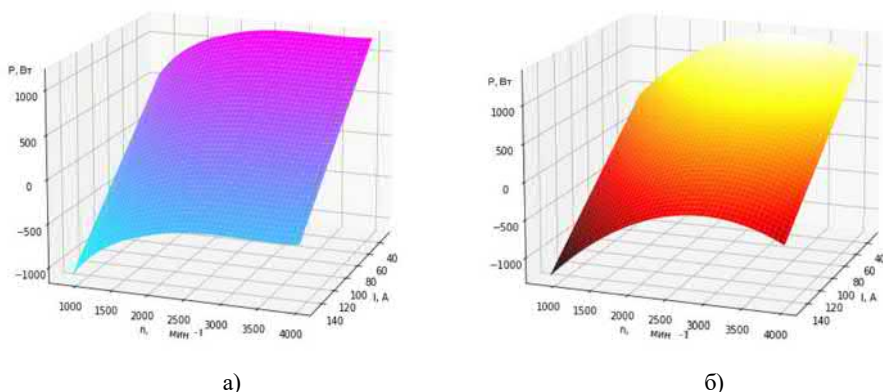


Рисунок 2 – Поверхности зарядного баланса: а) для сплайн аппроксимации; б) для полиномиальной регрессионной модели

Повышение энергообеспеченности БЭК автотранспортного средства может быть достигнуто за счёт изменения максимального генерируемого тока или за счёт повышения номинального напряжения бортовой сети. Так как существует предел максимальной токовой нагрузки БЭК, в модели сделан акцент на исследование зарядного баланса при задаваемом напряжении бортовой сети автотранспортного средства.

Однако предложенная модель не позволяет построить в полной мере адекватную картину энергопотребления БЭК при разных режимах эксплуатации автомобиля. Именно поэтому в рамках диссертации предлагается реализовать методику оценки энергообеспеченности БЭК автомобиля при различных уровнях питающего напряжения.

**В третьей главе** для решения задачи связанной с классификацией ЭС и ЭК по группам, с количественно-качественной оценкой характера влияния изменения уровня питающего напряжения на технико-эксплуатационные характеристики, предложена соответствующая методика.

Бортовой электротехнический комплекс автомобиля предложено разделить на три группы ЭС и ЭК (рисунок 3).

К первой группе относится электрооборудование, технико-эксплуатационные характеристики которого практически не зависят от изменения уровня номинального напряжения в рассматриваемых изменяемых границах от 12 до 48 В. В состав группы входят все бортовые электрические машины, такие как генератор и электродвигатели, особенно электродвигатели с возбуждением от постоянных магнитов.

Ко второй группе относится электрооборудование, технико-эксплуатационные характеристики которого с повышением напряжения ухудшаются. В эту группу входят коммутационная аппаратура и светосигнальная аппаратура.

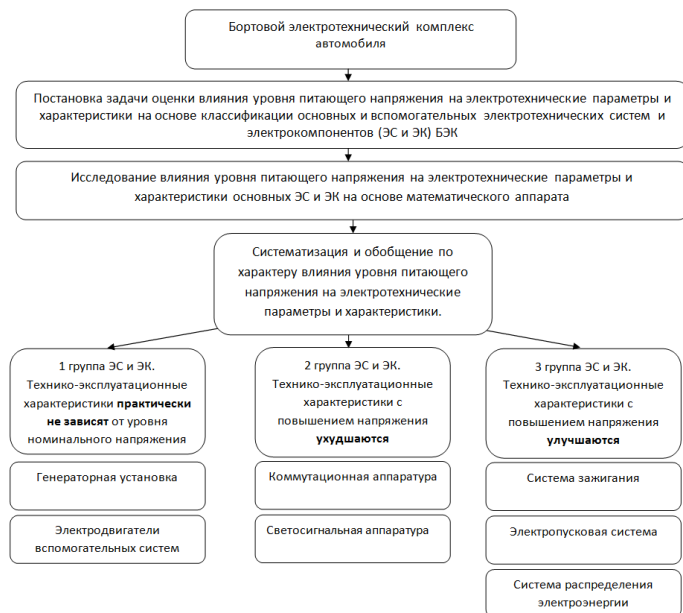


Рисунок 3 – Классификация ЭС и ЭК с учетом влияния уровня номинального питающего напряжения на технико-эксплуатационные характеристики

При повышении напряжения, ухудшаются характеристики ламп накаливания (ЛН), так как размеры спирали нити накаливания пропорциональны размерам нити из которых она свита

$$d_{cn2} = d_{cn1} \cdot \left( \frac{U_1}{U_2} \right)^{2/3}, \quad (3)$$

$$l_{cn2} = l_{cn1} \cdot \left( \frac{U_2}{U_1} \right)^{2/3}, \quad (4)$$

где  $U_1, U_2$  – номинальные напряжения ЛН,  $d_{cn1}, d_{cn2}$  – диаметр спирали ЛН при напряжении  $U_1$  и  $U_2$  соответственно,  $l_{cn1}, l_{cn2}$  – длина спирали ЛН при напряжении  $U_1$  и  $U_2$ .

Технико-эксплуатационные характеристики ЭС и ЭК входящих в третью группу электрооборудования улучшаются с повышением напряжения. К этой группе относятся: система зажигания, бортовая электропроводка, система пуска.

Общая масса проводов системы распределения электроэнергии при изменении напряжения меняется в соответствии с выражением:

$$M_2 = M_1 \cdot \left( A + B \cdot \left( \frac{U_1}{U_2} \right)^{\frac{4}{3}} + C \cdot \left( \frac{U_1}{U_2} \right)^2 \right), \quad (5)$$

где  $M_2$  – масса проводов, рассчитанных для номинального напряжения  $U_2$ ;

$M_1$  – масса проводов, рассчитанных для номинального  $U_1$ ;

$A$  – отношение массы проводов с минимальным сечением к общей массе проводов;

$B$  – отношение массы проводов, рассчитанных по допустимой температуре, к общей массе проводов;

$C$  – отношение массы проводов, рассчитанных по допустимому падению напряжения, к общей массе проводов.

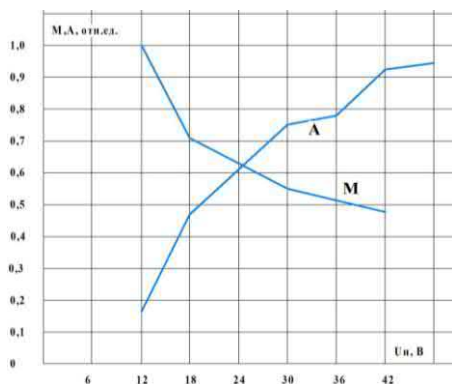


Рисунок 4 – Зависимость конструктивной массы проводов  $M$  и относительной массы проводов с минимальным сечением  $A$  от номинального напряжения бортсети автомобиля.

С учетом того, что коэффициент  $C$  много меньше коэффициента  $B$ , тогда (5) можно представить в виде:

$$M_2 = M_1 \cdot \left( A + (1 - A) \cdot \left( \frac{U_1}{U_2} \right)^{\frac{4}{3}} \right) \quad (6)$$

Масса электропроводки значительно снижается вплоть до уровня питающего напряжения БЭК равного 18 В (рисунок 4). При дальнейшем повышении напряжения тенденция снижения замедляется, т.е. растет доля проводов, имеющих минимально допустимое сечение.

С увеличением напряжения расширяются функциональные возможности системы зажигания (СЗ) благодаря увеличению диапазона регулировки угла включения первичного тока. Однако при этом существенно растет установившееся значение этого тока, вследствие чего при отказе выходного каскада блока управления СЗ возрастает вероятность повреждения катушки, и требуется уделять особое внимание защите катушки от подобных режимов (рисунок 5).

Суммарная масса системы пуска с ростом напряжения вначале снижается, достигая некоторого наименьшего устойчивого уровня при напряжении 24 В

(рисунок 6). При этом масса стартерного электродвигателя остается на неизменном уровне.

Учитывая все вышеизложенное, можно предложить наиболее целесообразное рабочее напряжение современного БЭЖ автомобиля на уровне 24 В.

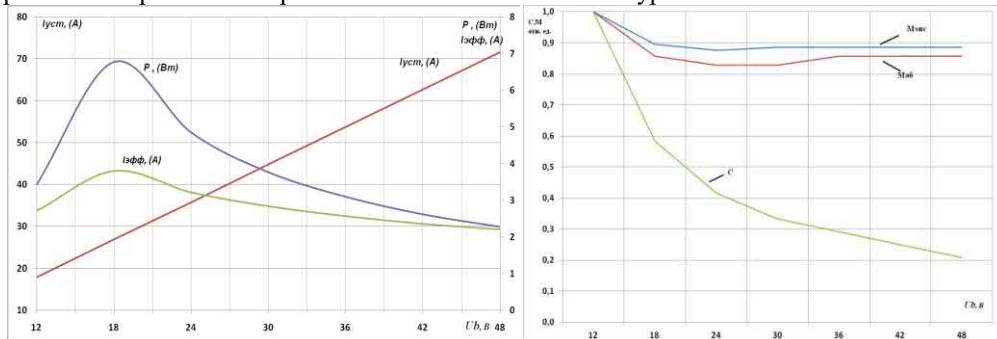


Рисунок 5 – Зависимости параметров системы зажигания от номинального напряжения  $U_b$

$I_{уст}$  – установившееся значение тока первичной цепи,  $I_{эфф}$  – эффективное значение тока,  $P$  – мощность потерь первичной цепи

Рисунок 6 – Зависимость параметров ЭПС от номинального напряжения  $U_b$  для режима холодного запуска ДВС  
 $M_{эпс}$  – масса ЭПС,  $M_{аб}$  – масса АКБ,  $C$  – емкость АКБ

**Четвёртая глава** посвящена разработке методики оценки энергообеспеченности бортового электротехнического комплекса автомобилей, с учетом свойств генерации, потребления, заряда аккумуляторной батареи при различных режимах эксплуатации, построенной на основе экспериментальных данных и компьютерного моделирования дорожного испытания.

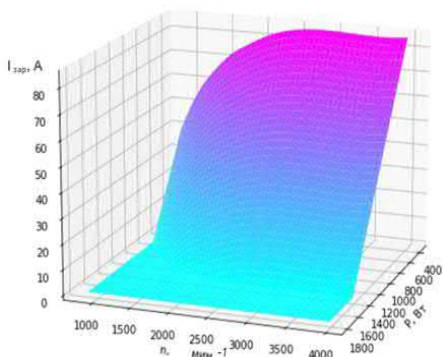
Во второй главе было показано, что энергообеспеченность БЭЖ должна включать надежное обеспечение электроэнергией всех потребителей, а также эффективный заряд АКБ во всех режимах эксплуатации автотранспортного средства.

В четвертой главе рассмотрены два БЭЖ с генераторами на 14 и 28 В.

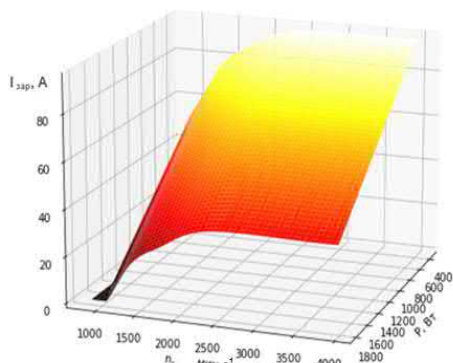
На рисунке 7 показаны поверхности зарядного тока АКБ в зависимости от оборотов двигателя и от мощности потребителей бортовой сети автотранспортного средства.

На рисунке 8 приведена поверхность тока заряда элемента АКБ в зависимости от оборотов двигателя и уровня питающего напряжения.

Таким образом полученные данные показывают, что повышение напряжения бортовой сети, при сохранении генерируемого тока, приводит к увеличению генерируемой мощности, что снижает токовую нагрузку на бортовую сеть, однако и снижает потенциальный ток заряда каждого элемента АКБ (рисунки 7, 8).



а)



б)

Рисунок 7 – Зависимость зарядного тока АКБ от числа оборотов двигателя и от мощности потребителей бортовой сети: а) для модели генератора 14 В; б) для модели генератора 28 В

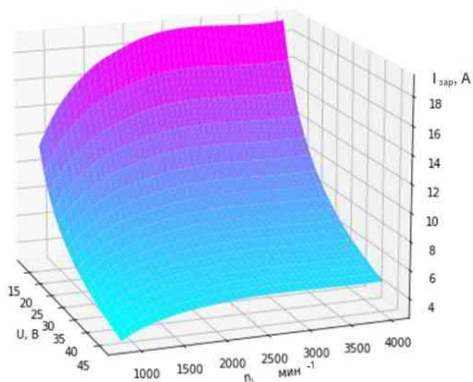
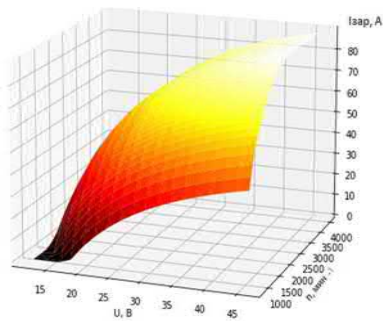


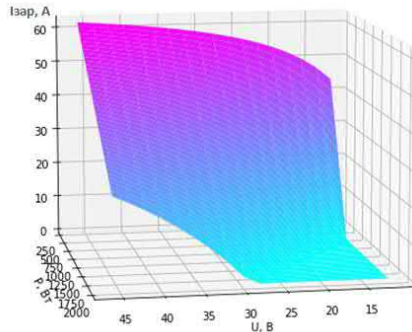
Рисунок 8 – Поверхность тока заряда элементов АКБ

На рисунке 9 а приведена поверхность тока заряда элемента АКБ в зависимости от напряжения бортовой сети автотранспортного средства и оборотов двигателя при совокупной мощности потребителей 1200 Вт. На рисунке 9 б приведена поверхность тока заряда элемента АКБ в зависимости от напряжения бортовой сети автотранспортного средства и совокупной мощности потребителей при заданных оборотах двигателя  $n=850 \text{ мин}^{-1}$ .

Анализ построенных зависимостей показывает, что увеличение напряжения бортовой сети автотранспортного средства ведёт к нелинейному изменению тока заряда отдельных элементов АКБ.



а)



б)

Рисунок 9 – Зависимость зарядного тока элементов АКБ а) от напряжения бортовой сети и оборотов двигателя; б) от напряжения бортовой сети и мощности потребителей

Исходя из принципа обеспечения рекомендуемого тока заряда каждого элемента АКБ разработана математическая модель определения напряжения бортовой сети автотранспортного средства, обеспечивающего рекомендуемый ток заряда АКБ при заданных оборотах двигателя и мощности потребления бортовой сети:

$$U_{\text{борт}}(n, P_{\text{потр}}) = \lim_{I_{\text{зар}} \rightarrow I_{\text{рек}}} \frac{P_{\text{потр}}}{I_{\text{ген}}(n) - I_{\text{зар}}(U_{\text{борт}}, P_{\text{потр}}, n)}, \quad (7)$$

где  $U_{\text{борт}}$  – напряжение бортовой сети,

$P_{\text{потр}}$  – мощность потребителей,

$I_{\text{зар}}$  – зарядный ток элемента АКБ,

$I_{\text{рек}}$  – рекомендуемый ток заряда элемента АКБ,

$I_{\text{ген}}$  – сила тока отдачи генератора,

$n$  – число оборотов ДВС.

На основе математической модели построена численная модель в среде Python. На рисунке 10 приведена полученная с помощью численной модели поверхность, иллюстрирующая зависимость напряжения бортовой сети автотранспортного средства, обеспечивающего эффективный заряд АКБ в зависимости от оборотов двигателя и мощности потребления.

Рассмотренный инструментарий позволяет производить анализ энергообеспеченности БЭК автотранспортного средства при заданных статических параметрах.

Для проведения исследования энергообеспеченности БЭК в динамике разработан инструментарий на основе матрицы скоростей. Для реализации инструментария, на первом этапе проводился натурный эксперимент, заключающийся в видеозаписи изменения оборотов двигателя во время поездки автомобиля Lada Granta по заданному маршруту.

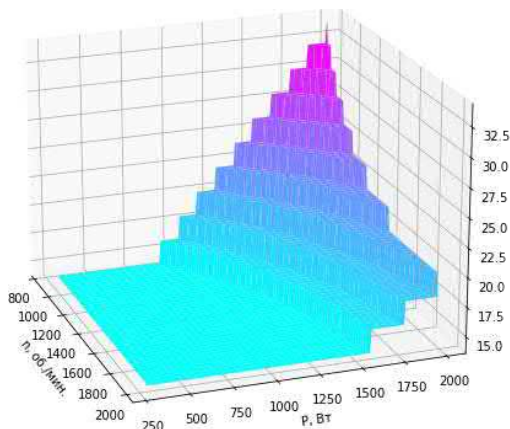


Рисунок 10 – Поверхность напряжения бортовой сети, обеспечивающего рекомендуемый ток заряда АКБ.

На основе полученных в ходе эксперимента данных, была построена таблица зависимости скорости автомобиля и номера передачи коробки переключения от времени движения. С использованием требований стандарта ГОСТ Р 41.83–2004 и результатов эксперимента построена зависимость (рисунок 11) изменения оборотов ДВС ( $n$ ,  $\text{мин}^{-1}$ ) в функции времени движения автомобиля ( $t$ , с).

Использование предложенной на рисунке 11 диаграммы в рамках разработанной методики требует трансформации данных. Для этого разработан подход формирования матрицы скоростей в виде зависимости изменения скорости автотранспортного средства от времени движения автомобиля. Матрица формируется на основе трёх режимов работы коробки переключения передач (КПП):

- минимальные обороты двигателя (нейтральная передача или выжатое сцепление);
- постоянные обороты двигателя (участок поездки с неизменной скоростью);
- линейно изменяющиеся обороты двигателя (разгон или торможение на передаче);

Первому режиму соответствует нулевая скорость, второму фиксированная скорость, третьему диапазон изменения скорости.

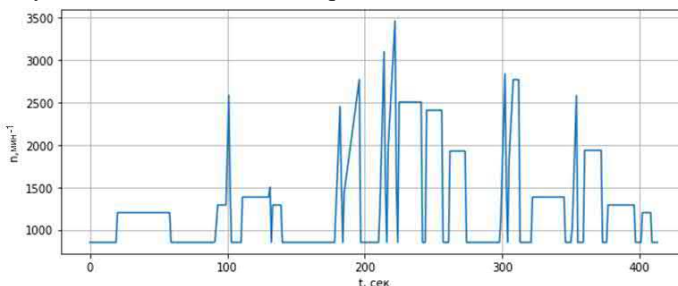


Рисунок 11 – Зависимость значения оборотов двигателя от времени

Матрица скоростей позволяет строить модель движения АТС без привязки к его характеристикам. Это создает предпосылки для учета:

- токоскоростной характеристики генератора;
- совокупной мгновенной мощности потребителей;
- диаметра колёс;
- передаточного числа коробки переключения передач;
- «характера поездки» определяющее условие переключения передач по оборотам двигателя

– номинального напряжения бортовой сети автотранспортного средства.

Для построения численной модели предложена функция на языке Python:

```
def IGmax(Nn, In, Kgen, Rw, Kred, TN, S, Nmax, Nmin, TopSpeed):
    l=np.pi*Rw*2
    TR=1
    NSA=np.zeros([TopSpeed])
    for s in range(TopSpeed):
        NSA[s]=s*1000*TN[TR-1]*Kred/(60*1) if s*1000*TN[TR-1]*Kred/(60*1)>Nmin else Nmin
        if NSA[s]>Nmax and TR<=4: TR=TR+1
    n=NSA[int(S)]*Kgen
    tck = interpolate.splrep(Nn, In)
    Igen=interpolate.splev(n,tck)
    return Igen
```

Применение данной методики позволяет моделировать энергообеспеченность БЭЖ автотранспортного средства при различных уровнях напряжения бортовой сети. На рисунке 12 приведены поверхности изменения мгновенного тока заряда элементов АКБ в рамках дорожного испытания, при использовании генераторов на 14 В и 28 В.

На рисунке 13 приведены линии пересечения данных плоскостей с нулевой поверхностью для генераторов на 14 и 28 В.

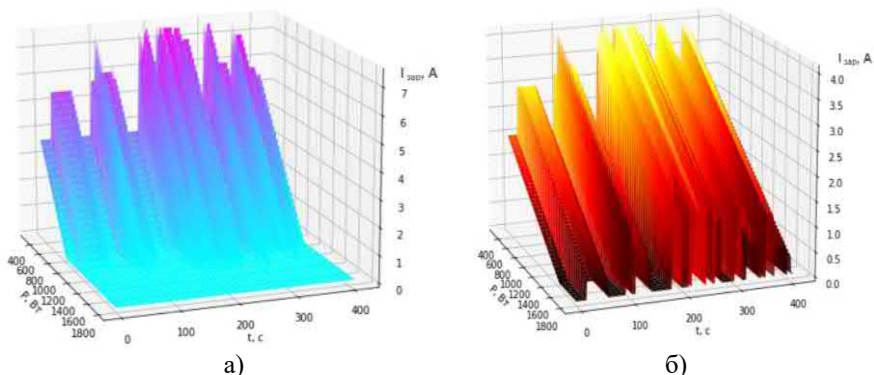


Рисунок 12 - Зависимость зарядного тока элемента АКБ от времени и мощности потребителей: а) для модели генератора 14 В; б) для модели генератора 28 В



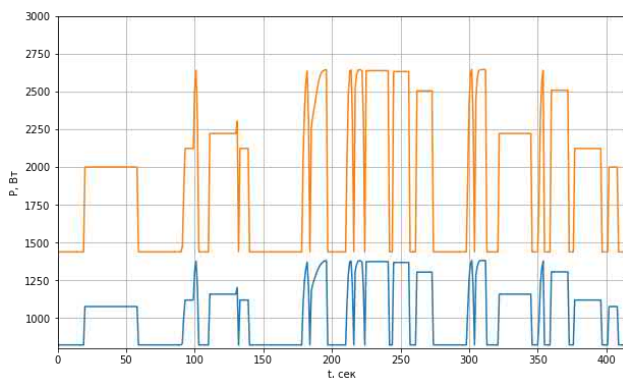


Рисунок 13 – Линии пересечения поверхностями плоскости нуля для генераторов на 14 В (синяя линия) и для генератора на 28 В (оранжевая линия).

Исследуя построенные кривые значений силы тока заряда определено, что при использовании генератора 28 В заряд АКБ происходит с меньшими пульсациями. Применение методики оценки энергообеспеченности для двух БЭК с питающим напряжением 12 и 24 В на основе экспериментальных данных, показало, что отрицательный зарядный баланс достигается на питающем напряжении 12 В - при мощности потребления 820 Вт и выше, для напряжения 24 В соответственно при достижении мощности потребления 1480 Вт и выше. Соответственно при уровне напряжения 24 В сохраняется положительный зарядный баланс на протяжении всей смоделированной поездки.

Таким образом, разработанная методика решает научно-техническую задачу по оценке энергообеспеченности БЭК современных автомобилей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате диссертационного исследования решена важная научно-техническая задача, заключающаяся в совершенствовании средств и методик оценки энергообеспеченности бортового электротехнического комплекса современных автотранспортных средств при различных уровнях номинального питающего напряжения.

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Анализ проблемы энергообеспеченности современных автотранспортных средств, проведенный по средствам научно-технического обзора показал, что наблюдаемый в последние десятилетия количественный рост электрооборудования и электронных компонентов в бортовом электротехническом комплексе, привел к существенному увеличению потребляемой мощности, которая не достаточно полно компенсируется системой энергоснабжения с уровнем номинального питающего напряжения равным 12 В.

2. Разработана математическая модель оценки зарядного баланса БЭК автомобиля при различных уровнях номинального питающего напряжения. Математическая модель обеспечивает возможность получения результата оценки

уровня зарядного баланса, при изменении питающего напряжения, параметров нагрузки и числа оборотов двигателя. В результате работы с моделью зарядного баланса получены количественные показатели, определяющие зоны отрицательного и положительного зарядных балансов. Зона отрицательного зарядного баланса при существующем уровне напряжения бортовой сети значительная и приходится на режимы эксплуатации при низких оборотах ДВС и высоком уровне энергопотребления. Например, для автомобиля Lada Granta, зона отрицательного баланса находится в диапазоне следующих значений: при токе нагрузки свыше 80 А, что эквивалентно совокупной мощности потребителей равной 1120 Вт, и оборотах двигателя менее 2500 мин<sup>-1</sup>, при уровне напряжения генератора 14 В.

3. Предложена методика оценки влияния изменения уровня питающего напряжения бортовой сети автомобиля на электротехнические параметры и характеристики основных и вспомогательных электротехнических систем и электрокомпонентов (ЭС и ЭК).

По степени влияния номинального питающего напряжения на электротехнический комплекс современного автомобиля, основные электротехнические системы и электрооборудование предложено разделить на три группы:

- электрооборудование, технико-эксплуатационные характеристики которого практически не зависят от уровня номинального напряжения. В состав группы входят все бортовые электрические машины, как генератор, так и электродвигатели, особенно электродвигатели с возбуждением от постоянных магнитов.

- электрооборудование, технико-эксплуатационные характеристики которого с повышением напряжения ухудшаются. В эту группу входят коммутационная аппаратура и источники света.

- электрооборудование, технико-эксплуатационные характеристики которого улучшаются с повышением напряжения. К этой группе относятся: система зажигания, бортовая электропроводка, система пуска.

4. Разработана методика оценки энергообеспеченности бортового электротехнического комплекса, позволяющая произвести анализ зарядного баланса автомобиля с учетом параметров городского ездового цикла. Реализация предложенной методики позволяет проводить исследования в области оценки энергообеспеченности бортового электротехнического комплекса современных автомобилей при различных уровнях номинального питающего напряжения и изменяющихся режимах эксплуатации. Анализ результатов натурных испытаний показал, что в условиях городского цикла бортовая сеть автомобиля с питающим напряжением 12 В находится в режиме минимальной энергообеспеченности не менее 40 % времени. При этом условие максимальной энергообеспеченности наблюдалось 14 % времени поездки. Применение предложенной методики показало, что при переходе на питающее напряжение 24 В энергообеспеченность автомобиля достигается на всем интервале времени поездки.

5. Предложенные научно-технические решения вошли в устойчивую практику ПАО «КАМАЗ» и применяются при планировании и проведении контрольных дорожных испытаний новой автомобильной техники. К достоинствам предложенных программных решений относятся: относительная простота реализации; гибкость программы, обеспечивающая возможность быстрого

встраивания различных параметров определяющих дорожные циклы испытаний и алгоритмов обеспечения зарядных/разрядных параметров электрооборудования; приемлемый уровень достоверности результатов работы.

Дальнейшая работа по данной области исследования, просматривается в направлении детализации процесса синтеза электротехнического комплекса электрооборудования современных автомобилей с выбором в качестве рабочего напряжения 24 В. Выбор этого уровня номинального напряжения питания бортовой сети оправдан тем, что является стандартным для бортовых автомобильных систем отдельных проектов грузовых автомобилей, отвечает требованиям электробезопасности, а также наличием опыта разработки и эксплуатации элементов электрооборудования.

### **Благодарности**

Автор выражает искреннюю благодарность доктору технических наук Шакурскому Максиму Викторовичу, за ценные консультации и всестороннюю помощь. Особую признательность и благодарность автор выражает своему научному руководителю, доктору технических наук, Козловскому Владимиру Николаевичу за поддержку и участие в написании публикаций по теме диссертаций, а также за полезные замечания и плодотворное сотрудничество.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

### Перечень работ, опубликованных в изданиях, входящих в перечень ВАК

1. **Брачунова, У.В.** Численное моделирование зарядного баланса легкового автомобиля / **У.В. Брачунова** // Известия Тульского государственного университета. Технические науки.-2022. № 9. С. 453-458.

2. **Брачунова, У.В.** Решение задачи по определению рационального уровня напряжения бортовой сети легкового автомобиля с помощью численного моделирования зарядного баланса / **У.В. Брачунова** // Известия Тульского государственного университета. Технические науки.-2022. № 9. С. 473-482.

3. **Брачунова, У.В.** Исследование электротехнических характеристик электропусковой системы автомобиля при различных уровнях номинального напряжения бортовой сети / **У.В. Брачунова, В.Н. Козловский, М.В. Шакурский** // Известия Тульского государственного университета. Технические науки.-2022. № 6.

4. **Брачунова, У.В.** Исследование влияния изменения номинального напряжения бортовой сети на элементы автомобильной электроники / **У.В. Брачунова, В.Н. Козловский, М.В. Шакурский, А.В. Крицкий** // Известия Тульского государственного университета. Технические науки.-2022. № 6.

5. **Брачунова, У.В.** Расчетное исследование технико-эксплуатационных характеристик контактов бортового электротехнического комплекса легкового автомобиля при различных уровнях номинального напряжения/ **У.В. Брачунова, В.Н. Козловский, М.В. Шакурский, К.В. Киреев** // Известия Тульского государственного университета. Технические науки.-2022. № 5.

6. **Брачунова, У.В.** Исследование технико-эксплуатационных характеристик системы распределения энергии бортовой сети легкового автомобиля при различных уровнях номинального напряжения / **У.В. Брачунова, В.Н. Козловский, М.В. Шакурский, К.В. Киреев**// Известия Тульского государственного университета. Технические науки.-2022. № 5.

7. **Брачунова, У.В.** Исследование перенапряжений в бортовой сети легкового автомобиля при различных уровнях питающего номинального напряжения / **У.В. Брачунова,**

В.Н. Козловский, М.В. Шакурский, А.В. Крицкий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки.-2022. № 5.

8. **Брачунова, У.В.** Расчетное исследование технико-эксплуатационных характеристик электродвигателей вспомогательных систем легкового автомобиля при различных уровнях номинального напряжения бортовой сети / У.В. Брачунова, В.Н. Козловский М.В. Шакурский // Известия Тульского государственного университета. Технические науки.-2022. № 4. С. 105-109.

9. **Брачунова, У.В.** Расчетное исследование технико-эксплуатационных характеристик генераторной установки легкового автомобиля при различных уровнях номинального напряжения бортовой сети / У.В. Брачунова, В.Н. Козловский М.В. Шакурский // Известия Тульского государственного университета. Технические науки.-2022. № 4. С. 95-105.

10. **Брачунова, У.В.** Расчетное исследование технико-эксплуатационных характеристик системы зажигания легкового автомобиля при различных уровнях номинального напряжения бортовой сети / У.В. Брачунова, В.Н. Козловский М.В. Шакурский // Известия Тульского государственного университета. Технические науки.-2022. № 4. С. 84-89.

11. Козловский, В.Н. Результаты анализа качества электрооборудования на этапе выходного производственного контроля новых автомобилей / В.Н. Козловский, С.И. Клейменов, А.В. Крицкий, **У.В. Брачунова** // Электроника и электрооборудование транспорта. 2020. № 2. С. 43-47.

#### В изданиях, индексируемых Web of Science/Scopus

1. Kozlovsky, V. Influence of vehicles design and engineering parameters on the onboard electrical complex interference immunity / V.Kozlovsky, A.Podgorny, U.Brachunova, P.Nikolaev, Blagoveshchensky D., Shalda A. // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021. 2021. С. 1265-1268.

2. Kozlovsky, V.N. Performance analysis of electrical systems of vehicles under the external electromagnetic exposure / V.N.Kozlovsky, A.S.Podgorny, Y.V.Brachunova, P.A.Nikolaev, N.K.Efimov-Soini // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 3rd International Scientific-Practical Conference on Quality Management and Reliability of Technical Systems.BRISTOL, 2021. С. 012048.

#### Другие наиболее значимые публикации

1. **Брачунова, У.В.** Перспективы повышения класса напряжения бортовой сети современного автомобиля / У.В. Брачунова// Приоритетные направления развития науки и технологий: доклады XXX международной науч.-практич. конф.; под общ. ред. В.М. Панарина. – Тула: Инновационные технологии, 2022. – С.199-201

2. Саксонов, А.С. Компьютерное моделирование как инструмент обеспечения качества проектирования транспортных генераторных установок / А.С. Саксонов, В.Н. Козловский, **У.В. Брачунова**, В.А. Губанов // В сборнике: Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении. III Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием. Тула, 2022. С. 253-255.

3. Якунов, Д.М. тенденции научно-технического развития литий-ионных аккумуляторных батарей на автомобильном транспорте / Д.М. Якунов, В.В. Дебелов, В.Н. Козловский, **У.В. Брачунова** // Грузовик. 2021. № 11. С. 3-7.

4. Козловский, В.Н. Математическая имитационная модель оценки зарядного баланса автомобиля / В.Н. Козловский, **У.В. Брачунова**, А.В. Крицкий, А.С. Саксонов // Грузовик. 2021. № 7. С. 17-26.

5. Козловский, В.Н. Экспериментальные исследования помехоустойчивости электронных систем управления двигателем внутреннего сгорания и управления автоматизированной коробкой передач / В.Н. Козловский, А.С. Подгорный, **У.В. Брачунова**, П.А. Николаев, В.В. Дебелов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2021. № 1. С. 44-47.

6. Козловский, В.Н. Экспериментальная база для исследований помехоустойчивости электрооборудования современных автомобилей / В.Н. Козловский, П.А. Николаев, А.С. Подгорный, В.В. Дебелов, **У.В. Брачунова** // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 589-595.

7. Пьянов, М.А. Экспериментальное исследование возможностей производственного комплекса диагностики работоспособности системы электрооборудования автомобилей / М.А. Пьянов, В.Н. Козловский, А.В. Крицкий, **У.В. Брачунова** // Грузовик. 2020. № 12. С. 6-12.

8. Николаев, П.А. Исследование нарушений работоспособности электротехнических систем автотранспортных средств от внешних электромагнитных воздействий / П.А. Николаев, В.Н. Козловский, А.С. Подгорный, А.В. Крицкий, **У.В. Брачунова** // Электроника и электрооборудование транспорта. 2020. № 5. С. 40-45.

9. Козловский, В.Н. Практика решений проблем качества продукции, полученная с применением проектной деятельности на автосборочных предприятиях / В.Н. Козловский, Д.И. Благовещенский, А.В. Крицкий, **У.В. Брачунова** // Качество и жизнь. 2020. № 3 (27). С. 52-61.

10. Козловский, В.Н. Разработка методики межфункциональной проектной деятельности для решения проблем качества автомобилей в эксплуатации / В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров, **У.В. Брачунова**, А.Д. Муталов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2020. Т. 22. № 1 (93). С. 24-30.

#### Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

1. **Брачунова, У.В.** Инструментарий комплексного анализа энергоэффективности автотранспортных средств при различных уровнях напряжения питающей сети в режиме реального времени./ У.В. Брачунова, В.Н. Козловский, М.В. Шакурский// Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022682303 от 21.11.2022. Опубл. 21.11.2022, Бюл. № 12

2. **Брачунова, У.В.** Инструментарий определения уровня напряжения бортового электротехнического и электронного комплекса автотранспортного средства, обеспечивающего рекомендуемый ток заряда аккумуляторной батареи при заданных оборотах двигателя и мощности потребления бортовой сети./ У.В. Брачунова, В.Н. Козловский, М.В. Шакурский// Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022684504 от 14.12.2022. Опубл. 14.12.2022, Бюл. № 12

Подписано в печать.01.2023  
Выходные данные типографии  
Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.06  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»  
(протокол № 1 от 10.01.2023 г.)  
Заказ № \_\_\_\_\_. Тираж 100 экз.  
Отпечатано на ризографе.  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»  
Отдел типографии и оперативной полиграфии  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244