

*На правах рукописи*

КОЗЛОВА ТАТЬЯНА АЛЕКСАНДРОВНА

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА И ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ  
КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЯГОВОГО ПРИВОДА  
ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ**

Специальность 05.05.03 – «Колесные и гусеничные машины»

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Нижний Новгород – 2017

Работа выполнена на кафедре «Автомобили и тракторы» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.

Научный руководитель: **Блохин Александр Николаевич**  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Автомобили и тракторы» НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Официальные оппоненты: **Горелов Василий Александрович** доктор  
технических наук, профессор, заведующий  
кафедрой «Многоцелевые гусеничные машины и  
мобильные роботы» МГТУ им. Н.Э. Баумана

**Карпухин Кирилл Евгеньевич** кандидат  
технических наук, доцент, начальник управления  
«Комбинированные энергоустановки» ГНЦ РФ  
ФГУП «НАМИ»

Ведущая организация: **Ижевский государственный технический  
университет им. М.Т. Калашникова - ИжГТУ**

Защита диссертации состоится 20 июня 2017 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 212.165.04 в Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ГСП-41, ул. Минина, д. 24, ауд. 1315.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского государственного технического университета и на сайте университета по адресу: <http://www.nntu.ru/content/aspirantura-i-doktorantura/dissertacii>

Отзыв на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью организации, просим направлять в адрес ученого секретаря диссертационного совета и копии по электронному адресу: [ait.ngtu@mail.ru](mailto:ait.ngtu@mail.ru)

Автореферат разослан «\_\_» апреля 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор

Л.Н. Орлов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В России автомобильный транспорт является одним из самых крупных загрязнителей окружающей среды. Он загрязняет воздух, почвы, поверхностные воды, создает шум и вибрации, воздействует на здоровье населения. С каждым годом ситуация ухудшается за счет стремительного роста количества автомобилей и, соответственно, пробок. К проблеме загрязнения окружающей среды добавляется проблема истощения нефтяных запасов и, как следствие, повышение цен на топливо. Поэтому развитые страны давно делают ставку на альтернативные виды энергии. Особое внимание уделяется развитию электромобильной отрасли: производству, эксплуатации электромобилей и их инфраструктуры. Создавая новую экономику, Россия не может игнорировать данную отрасль. В связи с этим работы по созданию и исследованию электромобильного транспорта крайне актуальны, так как лежат в русле стратегических разработок по повышению экономической и экологической безопасности России.

**Степень разработанности темы исследования.** При проектировании электромобиля встает вопрос об оценке его пробега путем выбора конструктивных параметров тягового привода, включающих параметры электродвигателя, трансмиссии и источника питания. Разработанные ранее методики выбора конструктивных параметров тягового привода электромобиля для достижения заданного пробега основаны на уже хорошо изученных характеристиках батарей (свинцово-кислотных, никель-кадмиевых и др.). Производители современных тяговых аккумуляторных батарей (ТАБ) (никель-металлогидридных, литий-ионных и др.) при заявлении емкости батарей и других характеристик указывают различные условия по температуре, времени и току разряда, что затрудняет их сравнительный анализ и приводит к неоднозначной оценке зарядно-разрядных характеристик, существенно влияющих на пробег электромобиля. Кроме этого разработанные ранее методики используют упрощенные уравнения движения электромобиля при постоянной скорости или в циклах, не соответствующих реальным условиям движения. Поэтому совершенствование методик расчета и выбора конструктивных параметров электромобиля с учетом процесса разряда ТАБ и полномасштабной модели движения транспортного средства в современных городских условиях является актуальным направлением развития методик улучшения эксплуатационных характеристик электромобиля при его проектировании.

**Цель работы.** Разработка методики расчета и выбор рациональных конструктивных параметров тягового привода электромобиля на основе теоретических и экспериментальных исследований с целью улучшения тягово-скоростных и энергетических показателей эксплуатационных свойств.

### **Научная новизна.**

- Разработана методика расчета и выбора рациональных конструктивных параметров тягового привода электромобиля, отличающаяся моделированием движения в городском цикле, с

учетом особенностей работы электродвигателя и процесса разряда батареи.

- Впервые разработана методика определения энергетических показателей эксплуатационных свойств с учетом эквивалентной мощности движения электромобиля за цикл.
- Получены теоретические зависимости времени разгона электромобиля, пробега на одной зарядке, израсходованной энергии батарей, пробега электромобиля за жизненный цикл батарей от удельной энергии ТАБ, массы комплекта батарей, передаточного числа трансмиссии при движении в городских условиях.

**Объект исследования.** Электромобиль «ГАЗель-Next Electro» с электродвигателем Siemens.

**Теоретическая значимость работы.** Разработанная методика позволяет улучшить сочетание тягово-скоростных и энергетических показателей эксплуатационных свойств электромобиля путем рационального выбора конструктивных параметров, приближая характеристики электромобиля к бензиновым аналогам.

**Практическая значимость работы.** Разработанная методика расчета и выбора рациональных конструктивных параметров электромобиля позволяет уменьшить затраты времени и средств на проведение экспериментальных исследований эксплуатационных характеристик автомобиля, а также снизить стоимость доводочных испытаний.

**Методы исследования.** В теоретических исследованиях использованы численные методы решения нелинейных систем дифференциальных уравнений, метод построения универсальной кривой разряда, метод математического моделирования, планирования виртуального эксперимента, графоаналитический метод и метод теории оптимизации.

Экспериментальное исследование электромобиля проводилось на динамометрической дороге полигона ООО «ОИЦ». Определение расхода электроэнергии осуществлялось по методике Правил ЕЭК ООН № 101 с использованием специального испытательного и современного измерительного оборудования.

**Основные положения, выносимые на защиту.**

- Методика расчета и выбор рациональных конструктивных параметров тягового привода электромобиля, математическая модель движения электромобиля в городском цикле ГОСТ Р ЕН 1986-1-2011, математическая модель разряда батарей, методика определения энергетических параметров, алгоритм расчета и выбора.
- Теоретические и экспериментальные исследования эксплуатационных показателей движения электромобиля.

- Практические рекомендации по выбору конструктивных параметров для электромобиля «ГАЗель-Next Electro» в соответствии с его оперативно-функциональным назначением.

**Достоверность результатов работы.** Экспериментальными исследованиями, проведенными на электромобиле, установлены справедливость физических представлений и теоретических положений, обоснованность допущений и адекватность математических моделей.

**Апробация работы.** Основные положения работы и результаты исследований докладывались и обсуждались на 79-й Всероссийской молодежной научно-технической конференции АИИ (г. Н. Новгород, НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2012 г.) и на XV Международной научно-технической конференции «Будущее технической науки» (г. Н. Новгород, НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2016 г.), а также на Международной научно-практической конференции (04 сентября 2016 г, г. Ижевск) «Новая наука: теоретический и практический взгляд» (г. Стерлитамак: АМИ, 2016 г.).

**Реализация результатов работы.** Программный комплекс «Расчет параметров движения электромобиля», реализующий разработанную методику и алгоритмы расчета показателей эксплуатационных свойств, основанных на математических моделях движения электромобиля, и включающий математическую модель разряда батарей, внедрен при создании новых и модернизации существующих электромобилей «ГАЗель-Next Electro» в ОИЦ «ГАЗ» и используется в учебном процессе на кафедре «Автомобили и тракторы» НГТУ им. Р. Е. Алексеева в рамках образовательной программы «Конструирование и расчет автомобиля».

**Публикации.** Материалы диссертационной работы представлены в 3 научных публикациях, 3 тезисах научных докладов.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, списка использованных источников. Содержит 155 страниц основного машинописного текста, 74 рисунка, 31 таблицу, список использованных источников из 152 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулированы цели исследования, определены научная новизна и практическая значимость, приведены структура и объем работы.

**В первой главе** описаны предпосылки для распространения электромобилей и стратегия их развития.

Проведен обзор и анализ работ, посвященных исследованию автомобилей с тяговым электроприводом и их эксплуатационных свойств отечественных и зарубежных исследователей, в их числе С. Р. Аманов, С. В. Бахмутов, Б. П. Бусыгин, К. Л. Богданов, Е. Е. Баулина, Д. В. Вершинин, В. А. Горелов, А. В. Гуськов, И. Д. Гурьянов, Ю. В. Дементьев, О. Г. Дашко, И. С. Ефремов, О. В. Закарчевский, П. А. Златин, И. Д. Изосимов, Д. Б. Изосимов, В. Н. Кравец, А. В. Круташов, В. Н. Козловский, И. П. Ксенович, В. А. Кеменов, И. А. Куликов, К. Е. Карпухин, О. Г. Ключков, Г. О. Котиев, В. Б. Клепиков, М. С. Листвинский, В. В. Ломакин, С. А. Морозов, О. Б. Мокин и Б. И. Мокин, М. В. Нагайцев, А. А. Отарский, Ю. П. Петров, В. В. Селифонов, Н. С. Соломатин,

Н. К. Семенихин, Е. А. Смотров, В. В. Серебряков, В. И. Строганов, А. М. Серафимов, О. А. Ставров, А. Л. Скрипко, И. В. Стародубцева, В. А. Умняшкин, Н. М. Филькин, М. М. Фролов, С. Н. Флоренцев, С. А. Харитонов, Р. П. Хамидуллин, Ю. В. Чмиль и В. П. Чмиль, А. В. Шабанов, Д. В. Эблесон, Raghv Das и Peter Harrop, Ronald K. Jurgen, Mike Westbrook, Mehrdad Ehsani, Ali Emadi, Jimin Gao, Iqbal Husain, Granfranco Pistoia, D. Ragone, Lindsay Brook, Francois C. Badin и другие. Разработкой и созданием автомобилей с тяговым электроприводом занимаются такие крупные организации, как ФГУП «НАМИ» и ПАО «КамАЗ», Группа ГАЗ, АвтоВАЗ.

Рассмотрены существующие методики расчета и выбора конструктивных параметров Д. И. Гурьянова, А. В. Ионесьяна, О. Б. Мокина, Н. И. Слипченко, В. И. Строганова. Отмечено, что представленные методики имеют следующие недостатки: исследуются либо энергетические показатели электромобиля – из условия обеспечения пробега или минимальных затрат энергии, либо тягово-скоростные показатели – из условия обеспечения заданных тяговых характеристик, что не позволяет достичь одновременно рационального сочетания показателей тех и других свойств. В рассмотренных методиках не учитывается тип тяговых аккумуляторных батарей (ТАБ), существенно влияющий на показатели эксплуатационных свойств. Исключением является методика А. В. Ионесьяна, учитывающая тип батарей, но для ее использования требуется проведение трудоемкого эксперимента по определению постоянной Пейккерта, что существенно увеличивает время и средства на проведение исследования. D. Ragone, рассматривая процесс разряда тяговых батарей, предложил использовать аналитическую зависимость удельной энергии батарей от удельной мощности разряда, которая известна как кривая Рагона. В работе P. Frantzeskakis использовались данные зависимости для определения пробега при постоянной скорости и разгона до этой скорости на основании упрощенной одномассовой математической модели движения транспортного средства. В существующих методиках не исследуется движение электромобиля в городском цикле, описывающем современные условия движения.

Для устранения указанных недостатков в существующих методиках расчета и выбора конструктивных параметров тягового привода электромобиля была сформулирована цель диссертационной работы и поставлены следующие задачи исследования:

1. Определить универсальную энергетическую характеристику разряда батареи, максимально приближенную к реальной, при минимальных затратах времени и средств;
2. Разработать методику определения энергетических показателей эксплуатационных свойств с учетом эквивалентной мощности движения электромобиля за цикл;
3. Разработать алгоритм расчета и выбора рациональных конструктивных параметров тягового привода электромобиля в соответствии с его оперативно-функциональным назначением на основании анализа тягово-скоростных и энергетических показателей, полученных с учетом особенностей работы электродвигателя и процесса разряда ТАБ;
4. Разработать комплекс программных средств для расчета и выбора рациональных значений конструктивных параметров;
5. Получить теоретические зависимости для оптимизируемых тягово-скоростных и энергетических показателей эксплуатационных свойств

электромобиля при движении в городских условиях от конструктивных параметров тягового привода;

6. Выбрать рациональные конструктивные параметры тягового привода для заданного объекта исследования;

7. Оценить достоверность основных теоретических положений, на основании которых разработана методика, путем сравнения расчетных и экспериментальных данных;

8. Внедрить разработанную методику при создании новых и модернизации существующих конструкций электромобилей.

**Во второй главе** рассмотрены характеристики разряда источника питания, характеристики городского цикла, используемые для моделирования движения электромобиля, методика определения энергетических показателей, теория планирования эксперимента и теории оптимизации, методика расчета и выбор рациональных конструктивных параметров тягового привода электромобиля.

Для разработки методики определения энергетических показателей в первую очередь необходимо знать универсальную разрядную характеристику батареи, полученную при моделировании процесса разряда методом D. Ragona.

На первом этапе моделирования строится зависимость емкости от тока разряда. Для этого используют эмпирические коэффициенты (табл. 1). Основой для расчета служит указанная производителем номинальная емкость батарей и соответствующее ей время разряда. Поделив номинальное значение емкости ( $Q_n$ ) на соответствующий номинальному значению времени разряда ( $C/t_i$ ) коэффициент корреляции ( $K_n$ ), можно определить значение емкости при одночасовом разряде ( $C/1$ ). Чтобы получить остальные значения емкости, необходимо значение емкости при одночасовом разряде умножить на ряд коэффициентов корреляции ( $K_i$ ).

$$Q_i = \frac{Q_n}{K_n} \cdot K_i, \quad (1)$$

где  $Q_n$  – емкость батареи, указанная производителем, (Ач);  $K_n$  – коэффициент корреляции, соответствующий номинальному значению времени разряда  $t_n$ ;  $K_i$  – коэффициент корреляции, соответствующий емкости  $Q_i$ .

Для определения ряда значений тока разряда следует полученные значения емкостей поделить на соответствующие значения времени разряда ( $t_i$ ):

$$I_i = \frac{Q_i}{t_i} \quad (2)$$

Таблица 1

Коэффициенты корреляции

Диапазон емкости	C/0,25	C/0,5	C/1	C/2	C/3	C/3,5	C/4	C/5	C/6	C/7	C/8	C/10
Коэффициенты корреляции	0,66	0,83	1,00	1,14	1,23	1,27	1,31	1,36	1,40	1,43	1,45	1,50

Строится зависимость емкости от тока разряда.

На втором этапе моделирования для анализа универсальной модели разряда батарей система ТАБ представлена в качестве упрощенной эквивалентной схемы, в которой согласование источника и нагрузки осуществляется по мощности. Максимальная мощность является наиболее значимым параметром для оценки эффективности ТАБ гибридных и электрических транспортных средств. Согласование по мощности обеспечивает получение в нагрузке максимально

возможной мощности. Для этого условие согласования нагрузки и источника выглядит как равенство сопротивления нагрузки ( $R_n$ ) и внутреннего сопротивления ( $R_b$ ) (рисунок 1). Адаптируя данную концепцию для эквивалентной электрической цепи ТАБ, эквивалентное сопротивление батареи ( $R$ ) равно:

$$R = \frac{U_{\min}^2}{4P_{\max}}, \quad (3)$$

где  $P_{\max} = I_{\max} \cdot U_{I_{\max}}$  (4)  
 $U_{\min}$  – минимальное напряжение батареи;  $P_{\max}$  – максимальная мощность, (Вт);  $I_{\max}$  – максимальное значение тока разряда, (А);  $U_{I_{\max}}$  – напряжение батареи при разряде током  $I_{\max}$  до 80% емкости, (В).

Моделирование процесса разряда универсальной модели ТАБ представляет собой разряд батареи при постоянном значении мощности. Задавшись рядом значений мощности ( $P_k$ ) определяется соответствующие ей значение тока разряда ( $I_{pk}$ ) и КПД батареи ( $\eta_k$ ):

$$I_{pk} = \frac{U_{\min} - \sqrt{U_{\min}^2 - 4P_k R}}{2R}; \quad \eta_k = \frac{\left(1 + \sqrt{\left(1 - \frac{P_k}{P_{\max}}\right)}\right)}{2} \quad (5)$$

С помощью полученной ранее зависимости емкости батарей от тока разряда  $Q=f(I)$  для каждого значения тока разряда  $I_{pk}$  определяется значение емкости  $Q_k=f(I_{pk})$  и, соответственно, время разряда  $t_k = \frac{Q_k}{I_{pk}}$ . Удельная мощность и удельная энергия находятся по формулам:

$$P_{уд k} = \frac{P_k}{M_b}; \quad E_{уд k} = \frac{P_k}{M_b} t_k, \quad (6)$$

где  $P_{уд k}$  – удельная мощность разряда ТАБ,  $\frac{Вт}{кг}$ ;  $E_{уд k}$  – удельная энергия ТАБ,  $\frac{Вт \cdot ч}{кг}$ ;  $M_b$  – масса комплекта батарей, кг.

Строится зависимость удельного расхода энергии батареи от удельной мощности  $E_{уд} = f(P_{уд})$  (рис. 1).

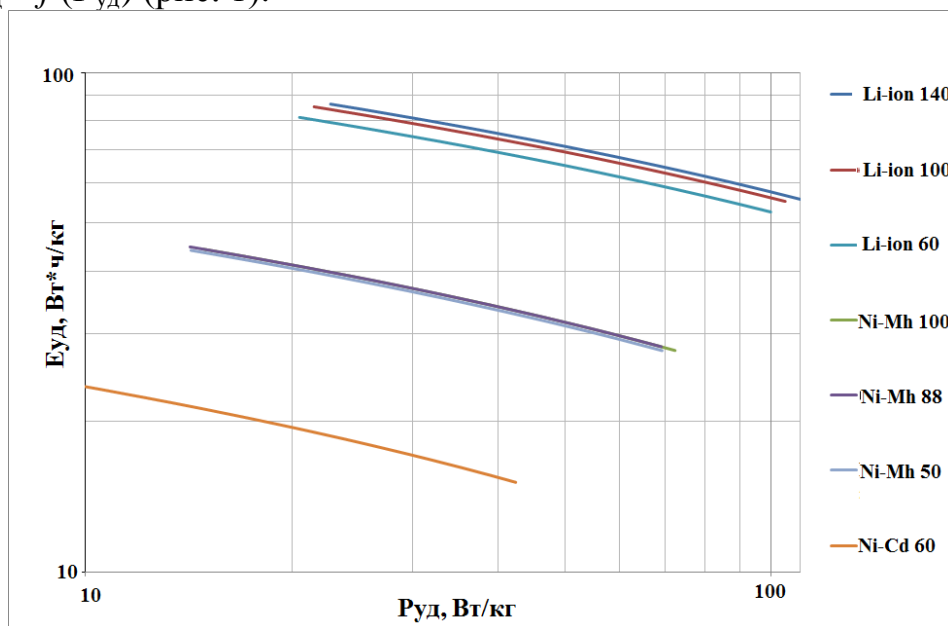


Рис. 1. Зависимость удельного расхода энергии от удельной мощности для различных типов батарей



Далее, в соответствии с уравнениями движения автомобиля (7), моделируется разгон электромобиля с максимальной интенсивностью, в результате чего определяется время разгона до скорости 60 км/ч и моделируется движение электромобиля в городском цикле ГОСТ Р ЕН 1986-1-2011. При этом необходимо учитывать нагрузочные характеристики электродвигателя. В отличие от характеристик двигателя внутреннего сгорания, они существенно зависят не только от угловой скорости и нагрузки на двигатель, но и от времени работы в определенном режиме. Поэтому в работе характеристика тягового электродвигателя задается в виде  $M_\delta = f(\omega, \alpha, t)$ .

Делается допущение, что движение автомобиля осуществляется по ровному прямолинейному участку дороги, без увода управляемых колес. В качестве дополнительного режима исследуется движение электромобиля с постоянной скоростью.

$$\left. \begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= (R_x - F_\sigma - G_a \sin \gamma) / m_a \\ \frac{d\omega_k}{dt} &= (M_\delta(\omega, \alpha, t) \cdot \eta_\delta(\omega, \alpha) \cdot U_k U_0 \cdot \eta_{mp} - M_f - R_x r_0) / \sum_{k=1}^m I_k \\ R_x / R_z &= f(s) \\ s &= 1 - \frac{V}{\omega_k \cdot r_0}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где  $G_a$  – вес автомобиля;  $m_a$  – масса автомобиля;  $R_x$  и  $R_z$  – продольные и вертикальные реакции на колесе;  $F_\sigma$  – сила сопротивления воздуха;  $\gamma$  – угол подъема;  $\omega_k$  – угловая скорость колеса;  $M_\delta$  – крутящий момент двигателя, зависящий от угловой скорости  $\omega$  коленчатого вала двигателя, нагрузки  $\alpha$  и времени работы  $t$ ;  $\eta_\delta$  – КПД электродвигателя, зависящий от угловой скорости и нагрузки;  $U_k, U_0$  – передаточное число коробки передач и главной передачи;  $\eta_{mp}$  – КПД трансмиссии;  $M_f$  – момент сопротивления движению;  $r_0$  – радиус качения колеса;  $s$  – коэффициент буксования.

В результате моделирования движения в городском цикле определяются затраты энергии ( $W$ ) за время движения в цикле ( $t_\text{ц}$ ). Таким образом, эквивалентная мощность электромобиля за цикл составит:

$$P_\text{ц} = \frac{W}{t_\text{ц}} \quad (8)$$

Соответственно, мощность разряда ТАБ и удельная мощность разряда:

$$P_V = \frac{P_\text{ц}}{\eta_\text{эд} \eta_\text{тр}}, \quad P_{\text{уд}V} = \frac{P_V}{M_\text{б}} \quad (9)$$

С помощью зависимости удельной энергии батарей от удельной мощности (кривой Рагона) определяется удельная энергия разряда ТАБ  $E_{\text{уд}V} = f(P_{\text{уд}V}) \left( \frac{\text{Втч}}{\text{кг}} \right)$ . Учитывая, что батарея разряжается на 80%, количество отданной энергии умножается на коэффициент 0,8. Время разряда ТАБ составит:

$$t = \frac{0.8 E_{\text{уд}V}}{P_{\text{уд}V}} \quad (10)$$

Первый энергетический параметр – пробег электромобиля на одной зарядке при движении в городском цикле протяженностью 1,013 км – составит:

$$S = 1,013 \frac{t}{t_{\text{ц}}} \quad (11)$$

При этом количество энергии, затраченное на обеспечение данного пробега, определяется как:

$$E_{\text{б}} = \frac{0,8 E_{\text{уд}} V M_{\text{б}}}{1000} \quad (12)$$

Третий энергетический параметр – общий пробег электромобиля за весь жизненный цикл ТАБ – равен:

$$S_{\text{общий}} = S \cdot C, \quad (13)$$

где  $C$  – число циклов разряда и заряда ТАБ.

Таким образом, впервые разработана методика определения энергетических показателей эксплуатационных свойств с учетом эквивалентной мощности движения за цикл.

Энергетические параметры определяются через энергетическую характеристику батареи, полученную путем разряда ТАБ постоянной мощностью при минимально возможном напряжении. Определение реального напряжения разряда подразумевает наличие экспериментального исследования процесса разряда конкретной батареи. Полученные значения пробегов и энергии являются базовыми (минимальными) величинами реальных результатов, поскольку определены при минимальном напряжении разряда батареи и учитывают расход энергии на собственные нужды при наихудших условиях. Таким образом представляется возможным проведение сравнительного анализа.

Экономический параметр – стоимость комплекта батарей – рассчитывается:

$$\text{Ц} = \frac{\text{руб}}{\text{кВтч}} \cdot \frac{U_{\text{эд}} \cdot Q_{\text{n}}}{1000}, \quad (14)$$

где  $\frac{\text{руб}}{\text{кВтч}}$  – стоимость одного кВтч энергии определенного типа ТАБ, руб;  $U_{\text{эд}}$  – рабочее напряжение электродвигателя, В;  $Q_{\text{n}}$  – номинальная емкость ТАБ, Ач.

Далее происходит планирование виртуального эксперимента, в результате которого определяются расчетно-теоретические зависимости тягово-скоростного и энергетических показателей эксплуатационных свойств, а также стоимости комплекта батарей от удельной энергии батарей ( $E_{\text{уд}}$ ), массы комплекта батарей ( $M_{\text{б}}$ ), передаточного числа трансмиссии ( $u_{\text{к}}$ ).

В работе рассматриваются два типа регрессионных моделей: линейная, с учетом парных взаимодействий, и квадратичная.

Поскольку исследовались семь видов батарей, в качестве плана эксперимента для всех моделей использовался семиуровневый трехфакторный полный факторный эксперимент с числом опытов  $N=7^3=343$ . Данный план является центральным композиционным ортогональным планом (ЦКОП) второго порядка с семью уровнями варьирования, что позволяет применить его к квадратичной модели без добавления звездного плеча  $\alpha_{\text{зв}}$ . Применение звездного плеча возможно в случае задания типа батарей диапазоном удельной энергии ТАБ, где можно определить характеристики батареи и значения выходных функций в звездных точках. Однако это проблематично при исследовании конкретных видов батарей. Соответствующие каждому значению ТАБ значения удельной энергии неравномерно распределены в порядке возрастания, вследствие этого каждому

значению  $E_{уд}$ , или типу батарей, присвоен порядковый номер, заданный целым числом. Таким образом, имеется только семь  $N=1 \dots 7$  значений удельной энергии.

Диапазон варьирования массы комплекта батарей и удельной энергии зависит от выбора варианта определения рационального типа. При исследовании конкретных видов батарей масса комплекта батарей зависит от типа батарей и рабочего напряжения тягового привода, значения удельной энергии располагают в порядке возрастания. При исследовании диапазона удельной энергии ТАБ масса комплекта батарей изменяется от 50% до 100% от максимально допустимой массы комплекта батарей, определяемой категорией транспортного средства. Удельная энергия изменяется в пределах заданного инженером интервала. В качестве напряжения тягового привода берется среднее значение рабочего напряжения электродвигателя. Передаточное число трансмиссии изменяется в пределах 40% от номинальной величины.

Математическое уравнение модели (уравнение регрессии) второго порядка имеет вид:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n b_{ijk} x_i x_j x_k + \sum_{i=1}^n \sum_{j=2}^n \sum_{k=3}^n \sum_{l=1}^n b_{ijkl} x_i x_j x_k x_l + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \sum_{m=1}^n b_{ijklm} x_i x_j x_k x_l x_m + \sum_{ii=1}^n b_{ii} x_{ii}^2, \quad (i \neq j \neq k \neq l \neq m), \quad (15)$$

где  $y$  – комплексный показатель оптимизации (тягово-скоростной или энергетический показатель эксплуатационных свойств);  $n$  – число факторов,  $n = 3$ ;  $x_1$  – соответствует значению удельной энергии или типу батарей  $E_{уд}$ ;  $x_2$  – масса комплекта батарей  $M_6$ ;  $x_3$  – передаточное число трансмиссии  $u_k$ ;  $b_i$ ,  $b_{ij}$ ,  $b_{ijk}$ ,  $b_{ijkl}$ ,  $b_{ijklm}$ ,  $b_{ii}$  – коэффициенты регрессии, учитывающие соответствующие взаимодействия факторов и квадратичные члены модели.

Коэффициенты регрессии определяются по следующим формулам:

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N y_j x_{ij}}{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2}; \quad b_{lm} = \frac{\sum_{j=1}^N y_j (x_l x_m)_j}{\sum_{j=1}^N (x_l x_m)_j^2} \quad (l \neq m); \quad b_{ii} = \frac{\sum_{j=1}^N y_j (x'_i)_j}{\sum_{j=1}^N (x'_i)_j^2}; \quad b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j - \sum_{i=1}^k b_{ii} \bar{x}_i^2, \quad (16)$$

где  $x'_i = x_i^2 - \bar{x}_i^2$  – нормализованный фактор, характеризующий влияние квадратичного члена модели;  $\bar{x}_i^2$  – среднее значение,  $N$  – число опытов в плане.

Значимость коэффициентов регрессии оценивается критерием Стьюдента, а адекватность модели – по критерию Фишера.

На основании полученных расчетно-теоретических зависимостей показателей эксплуатационных свойств автомобиля определяются рациональные конструктивные параметры в соответствии с его оперативно-функциональным назначением

В том случае, если исследуется небольшое количество видов батарей, целесообразно использовать метод графического анализа. Критерием оптимизации выступает оперативно-функциональное назначение автомобиля. С помощью графических иллюстраций исследуемых зависимостей выбираются рациональные значения конструктивных параметров.

Метод ЛП<sub>т</sub> - последовательности, состоящий из двух этапов, применяется в случае исследования диапазона удельной энергии. На первом этапе методики

определяются декартовы координаты каждой  $i$ -й пробной точки равномерно распределенной ЛП $_{\tau}$ - последовательности  $j$ -го показателя с учетом направляющих чисел  $r_j$  по формуле:

$$q_{i,j} = \sum_{k=1}^m 2^{-k+1} \left\{ \frac{1}{2} \sum_{l=k}^m [2\{i2^{-l}\}][2\{r_j^{(l)} 2^{k-1-l}\}] \right\}, \text{ где } m = 1 + [\ln i / \ln 2] \quad (17)$$

Определяется множество оптимальных по Парето конструктивных параметров в результате решения следующей задачи оптимизации:

$$\left. \begin{aligned} F_{tp} &= f_1(E_{y\delta}, M_{\delta}, u_k) \rightarrow \min \\ F_S &= f_2(E_{y\delta}, M_{\delta}, u_k) \geq [S] \\ F_{S \text{ общий}} &= f_3(E_{y\delta}, M_{\delta}, u_k) \rightarrow \max \\ F_{E\delta} &= f_4(E_{y\delta}, M_{\delta}, u_k) \rightarrow \min \\ F_{\Pi} &= f_5(E_{y\delta}, M_{\delta}) \rightarrow \min \\ M_{\delta} &\leq [M_{\delta}] \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

где  $F_{tp}$  – функция времени разгона электромобиля до скорости 60 км/ч;  $F_S$  – функция пробега электромобиля на одной зарядке;  $F_{S \text{ общий}}$  – функция пробега электромобиля за жизненный цикл батарей;  $F_{E\delta}$  – функция израсходованной на пробег электромобиля энергии батарей;  $F_{\Pi}$  – функция стоимости комплекта батарей; от типа батарей ( $E_{y\delta}$ ), массы комплекта батарей ( $M_{\delta}$ ), передаточных чисел трансмиссии ( $u_k$ ).

Во множестве эффективных точек Парето определяется пробная точка, соответствующая наилучшему значению наиболее значимого показателя для данной группы транспортных средств. Затем делается предположение, что это значение показателя может быть ухудшено на 1...3%, и в полученном множестве определяется эффективная точка Парето, соответствующая наилучшему значению второго по значимости показателя. Затем опять делается предположение, что это значение может быть ухудшено на 1...3%, и в полученном множестве определяется эффективная точка Парето, соответствующая наилучшему значению третьего по значимости показателя, и т.д. После перебора всех показателей в соответствии с их значимостью определяются рациональные конструктивные параметры.

Таким образом, на основании вышеперечисленного сформирована методика расчета и выбора показателей эксплуатационных свойств, представленная на рис. 2.

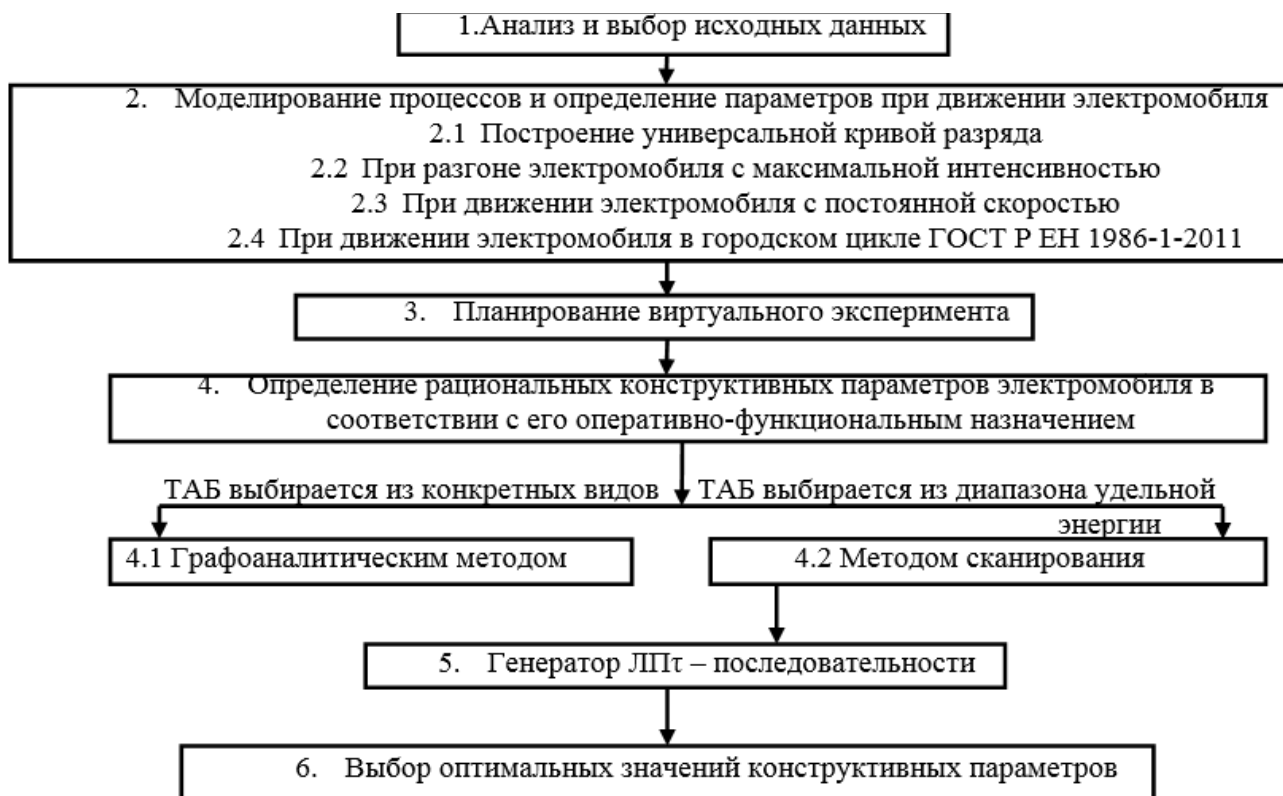


Рис. 2. Методика расчета и выбор рациональных конструктивных параметров тягового привода электромобиля.

В третьей главе в соответствии с изложенной методикой для электромобиля ГАЗель – Next Electro определяются теоретические зависимости исследуемых показателей и выбираются рациональные конструктивные параметры тягового привода.

На основании алгоритма разработанной методики был создан программный комплекс «Расчет параметров движения электромобиля», некоторые диалоговые окна которого представлены на рис. 3-4.

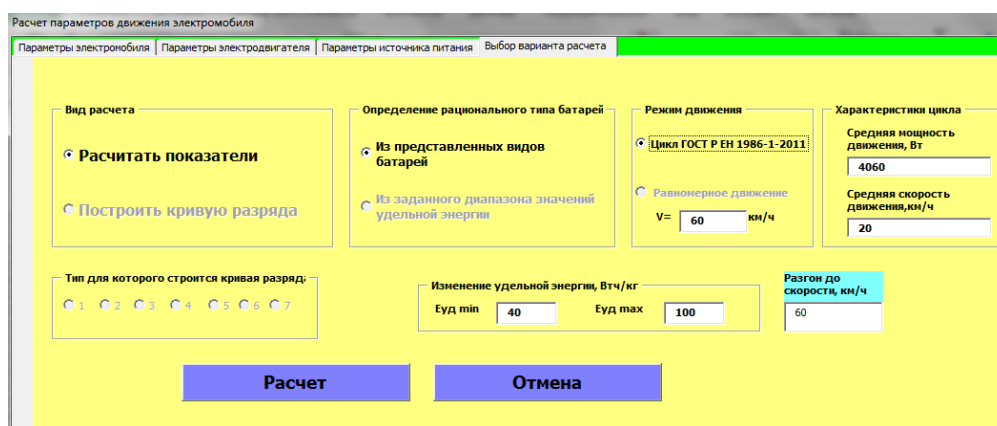


Рис. 3. Главное окно программы

Расчет параметров движения электромобиля

Параметры электромобиля | Параметры электродвигателя | Параметры источника питания | Выбор варианта расчета

Масса автомобиля, кг Полная: 4200 Снаряженная: 2280 Грузоподъемность: 1920			Максимальный вес батарей, кг 600
Подъем, % Преодолеваемый: 0 Максимальный: 25		Аэродинамика Коэф-т лобового сопротивления: 0,51 Площадь Мидел. сечения, м <sup>2</sup> : 4,69	
Колеса Радиус колеса, м: 0,33 Масса диска, кг: 8,5 Масса шины, кг: 12			Максимальная скорость, км/ч 130
Коэффициенты Сцепления колес с дорогой: 0,7 Сопр. качению при V=0 км/ч: 0,012 Сцепного веса: 0,67			
Параметры трансмиссии Передаточное число ПП: 5,125 КПД трансмиссии: 0,92 Диапазон изменения передаточных чисел КП, %: 20			
Передаточное число коробки передач 2: 1 передача 1: 2 передача 1: 3 передача 1: 4 передача 1: 5 передача 1: 6 передача		Обороты переключения передачи 8000 10000 10000 10000 10000	

Вставить данные из файла

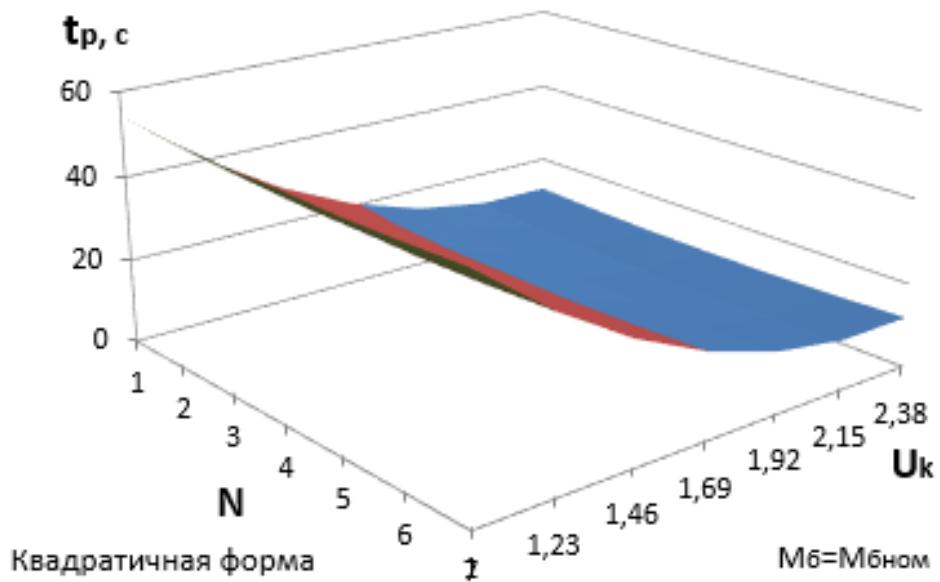
Рис. 4. Окно для ввода исходных данных по автомобилю и дорожному покрытию

В работе в качестве источника питания анализируются семь видов батарей: никель-кадмиевые батареи (Ni-Cd), емкостью 66 Ач, и никель-металлогидридные батареи (Ni-Mh), емкостью 50, 88 и 100 Ач, производства НИАИ «Источник» г. Санкт-Петербург, Россия; литий-ионные батареи (Li-ion), емкостью 70, 105 и 140 Ач, производства компании EnerZ. Масса комплекта батарей при этом определяется рабочим напряжением 300 – 350 В. Диапазон удельной энергии задан от  $40 \frac{\text{Втч}}{\text{кг}}$  до  $100 \frac{\text{Втч}}{\text{кг}}$ , при этом масса комплекта батарей составит от 300 кг до 600 кг. Передаточное число редуктора изменяется от 1 до 2,38.

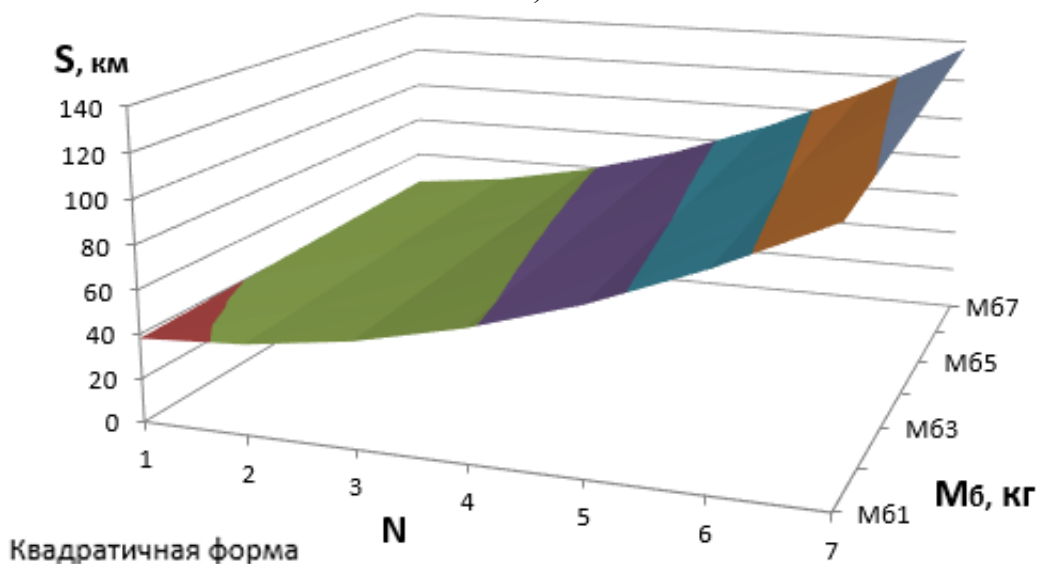
На основе формул (16) были получены коэффициенты регрессии с двумя типами моделей для двух вариантов задания типа ТАБ, среди которых определены значимые. Расчеты с использованием полученных коэффициентов регрессии показали, что линейный план с парными взаимодействиями не является адекватным для оценки тягово-скоростного и энергетических показателей, а также стоимости комплекта батарей при конкретно заданном типе ТАБ. Однако при задании типа батарей диапазоном удельной энергии, линейные зависимости достаточно хорошо отображают тенденции изменения показателей от конструктивных параметров, поэтому при расчетах в первом приближении их можно использовать.

Поскольку наиболее достоверную информацию о степени влияния конструктивных параметров на показатели эксплуатационных свойств имеют планы второго порядка, то дальнейший анализ проводился на их основе.

На рис. 5 в качестве примера показаны регрессионные зависимости времени разгона и пробега на одной зарядке в городском цикле.



а)



б)

Рис. 5. Расчетно-теоретические зависимости: а) время разгона до скорости 60 км/ч; б) пробег электромобиля на одной зарядке в городском цикле

По оперативно-функциональному назначению электромобили разделены на три группы: коммерческие электромобили ( $S_{\min} = 200$  км,  $m_r = 1920$  кг), электромобили для служб экстренного реагирования – скорая помощь, МЧС, пожарная машина, лаборатории ( $S_{\min} = 150$  км,  $m_r = 1300$  кг), электромобили для перевозки определенных слоев населения, таких как школьники и инвалиды ( $S_{\min} = 80$  км,  $m_r = 2000$  кг). Где  $S_{\min}$  – минимальный пробег;  $m_r$  – грузоподъемность. Параметры групп являются критериями оптимизации, в результате которой определены рациональные конструктивные параметры, представленные в табл. 2 и 3.

Таблица 2.

Рациональные конструктивные параметры тягового привода электромобиля ГАЗель-Next Electro в случае исследования конкретных видов батарей

Оперативно-функциональное назначение	Приоритет эксплуатационных показателей	Эксплуатационные показатели	Конструктивные параметры		
			М <sub>б</sub> , кг	N	U <sub>к</sub>
Коммерческий	S Ц S <sub>общий</sub> E <sub>б</sub> t <sub>p</sub>	147 км 730000 руб 440000км 45 кВтч 14,6 с	600	7	1,92
Для служб экстренного реагирования	t <sub>p</sub> S S <sub>общий</sub> Ц E <sub>б</sub>	10,27 с 147 км 440000 км 730000 руб 45 кВтч	600	7	2,36
Для перевозки отдельных слоев населения	Ц E <sub>б</sub> S <sub>общий</sub> S t <sub>p</sub>	203678 руб 15 кВтч 143425 км 75 км 15,3 с	650	3	1,7

Множество эффективных точек Парето для электромобиля ГАЗель-Next Electro приведено на рис. 6.

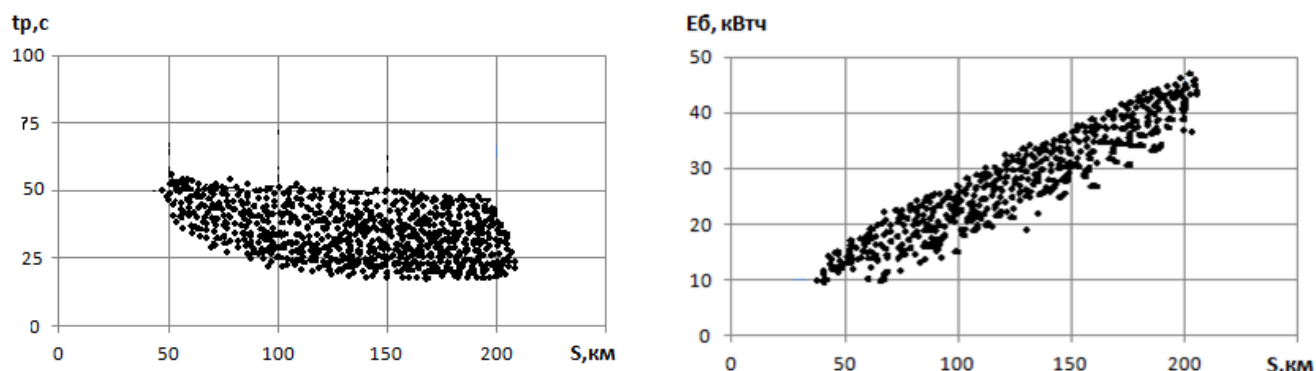


Рис. 6. Множество эффективных точек Парето для автомобиля ГАЗель-Next Electro

Таблица 3.

Оптимальные по Парето конструктивные параметры тягового привода электромобиля ГАЗель-Next Electro

Оперативно-функциональное назначение	Номер точек ЛП <sub>т</sub> послед-ти	Эксплуатационные показатели	Конструктивные параметры		
			М <sub>б</sub> ,кг	Еуд,Втч/кг	U <sub>к</sub>
Коммерческий	9664	180 км 900000 руб 640 000км 56 кВтч 12,5 с	600	100	2,15
Для служб	7950	11,1 с	600	92	2,38



экстренного реагирования		160 км 535000 км 764000 руб 50 кВтч			
Для перевозки отдельных слоев населения	5004	261000 руб 25 кВтч 180000 км 80 км 13 с	550	63	2,15

Индивидуальные характеристики оптимальных типов батарей, а именно масса одной батареи и ее емкость, представлены в табл. 4.

Таблица 4.

#### Характеристики оптимальных типов батарей

Оперативно-функциональное назначение	Конструктивные параметры		Параметры ТАБ			
	М <sub>б</sub> , кг	Еуд, Втч/кг	Тип	U <sub>б</sub> , В	m <sub>б</sub> , кг	Q <sub>б</sub> , Ач
Коммерческий	600	100	Li-ion	3,6	6,2	170
Для служб экстренного реагирования	600	92	Li-ion	3,6	6,1	150
Для перевозки отдельных слоев населения	550	63	Ni-Mh	1,25	2	100

**Четвертая глава** посвящена экспериментальным исследованиям и сравнению результатов теоретических исследований с экспериментальными данными.

Экспериментальные исследования проводились на электромобиле ГАЗель-Next Electro (ГАЗ-С46R9Е), разработанном по заказу фирмы СпецАвтоИнжиниринг для транспортировки специального оборудования и обслуживающего персонала в черте города и в пригороде. Для данного электромобиля в гл.3 выполнены расчетные исследования, в результате которых определены рациональные конструктивные параметры тягового привода электромобиля, обеспечивающие наилучшее сочетание тягово-скоростных и энергетических показателей, а именно на автомобиле установлен комплект батарей фирмы EnerZ массой 600 кг, емкость батарей составляет 140Ач, передаточное число редуктора 2,36. Рабочее напряжение тягового привода 350В.

На основании программы испытаний АГ-15-170 от 22.09.2015 г. в ОДИ ЦКИ были проведены испытания автомобиля ГАЗ-С46R9Е с электродвигателем ф. Siemens. Целью испытаний являлось определение показателя расхода электроэнергии на 100 км пути и показателя скоростных свойств.

Испытания проводились на динамометрической дороге полигона ООО «ОИЦ» в ноябре 2016 г. при температуре окружающего воздуха -8 ÷ -4° С. Автомобиль испытывался с полной массой – 4,2т.

Определение расхода электроэнергии (рис. 7) осуществлялось по методике Правил ЕЭК ООН № 101.



Рис. 7. Объект экспериментального исследования

Испытания по определению скоростного показателя проводились на динамометрической дороге полигона ООО «ОИЦ» в апреле 2016 г. при температуре окружающего воздуха +15° С.

В таблице 5 и на рис. 8 представлены теоретические и экспериментальные значения расхода энергии, а также расхождение между ними в процентах, значения скоростных показателей представлены в табл. 6.

Таблица 5

Сравнение теоретических и экспериментальных данных расхода энергии

Скорость установившегося движения, км/ч	Экспериментальный расход электроэнергии, кВтч/100км	Теоретический расход электроэнергии, кВтч/100км	Расхождение теоретических данных с экспериментальными, %
40	29,0	22,5	22,41
50	30,4	23,47	22,80
60	32,8	24,5	25,30
70	37,0	27,55	25,54
80	42,8	31,67	26,00

Расход энергии на установившихся режимах

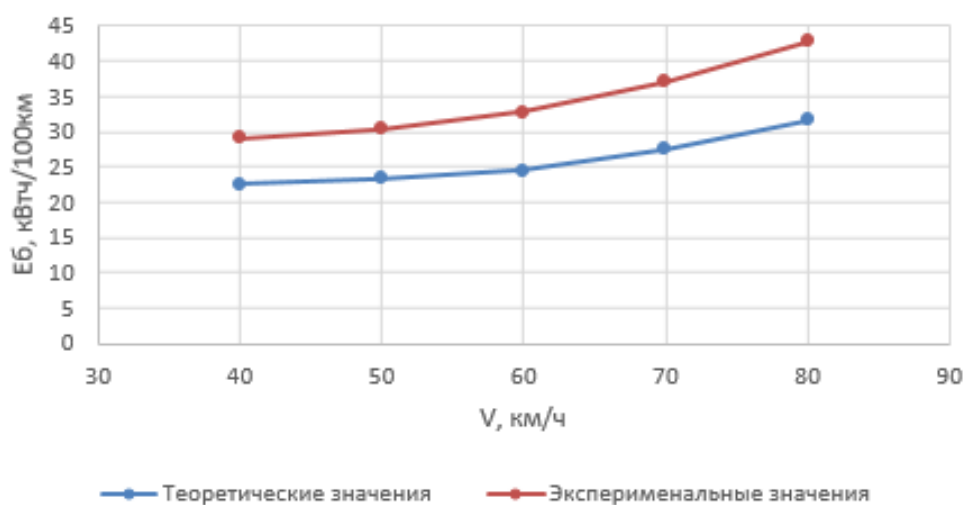


Рис. 8. Расхождение теоретических и экспериментальных данных

Сравнение теоретических и экспериментальных значений времени разгона

Скорость, до которой происходит разгон, км/ч	Время разгона (эксперимент), с	Время разгона (теоретическое), с	Расхождение теоретических данных с экспериментальными, %
60	10,5	9,27	-11,7
70	14,4	12,59	-12,6
80	19,1	17,39	-9,0

Сравнивая результаты, полученные расчетным и экспериментальным методами, можно отметить, что наблюдается качественное и количественное совпадение значений, т.е. одинаковые тенденции снижения величин и незначительные величины рассматриваемых отклонений. Расхождение теоретических и экспериментальных результатов расхода энергии составляет 24% – 26%. Данное расхождение объясняется тем, что теоретические значения расхода энергии получены при минимальном разрядном напряжении и заведомо меньше реальных. Однако их можно использовать для анализа. Поэтому расходимость результатов можно считать удовлетворительной. Максимальное расхождение теоретических и экспериментальных результатов скоростного показателя 12%.

Полученные значения отклонений теоретических результатов по отношению к экспериментальным результатам позволяют считать, что математическая модель адекватно отображает реальный процесс работы тяговых аккумуляторных батарей и электродвигателя в составе тягового электропривода автомобиля. Поэтому данная методика имеет право на существование и может использоваться для оценки конструктивных изменений тягового привода.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана методика расчета и выбора рациональных конструктивных параметров тягового привода электромобиля на основании моделирования его движения в городском цикле ГОСТ Р ЕН 1986-1-2011, с учетом особенностей работы электродвигателя и процесса разряда батарей, с помощью теории планирования виртуального эксперимента и критерия Парето.

2. Для различных типов батарей определена универсальная энергетическая характеристика разряда, а именно зависимость удельного расхода энергии от удельной мощности разряда, позволяющая определить энергетические показатели без проведения эксперимента.

3. Разработана методика определения энергетических показателей эксплуатационных свойств с учетом эквивалентной мощности электромобиля за цикл, описывающий современные условия движения.

4. На основании алгоритма разработанной методики расчета и выбора рациональных конструктивных параметров создан программный комплекс «Расчет параметров движения электромобиля».

5. Получены теоретические зависимости времени разгона, пробега электромобиля на одной зарядке, израсходованной энергии и пробега электромобиля за жизненный цикл батарей, стоимости комплекта батарей от типа батарей, массы комплекта батарей и передаточного числа трансмиссии. Установлено, что для этих зависимостей необходимо использовать виртуальные планы эксперимента второго порядка.

6. Для получения семейства электромобилей ГАЗель-Next Electro, включающих в себя грузовые, динамичные и пассажирские модификации трансмиссии, определены рациональные конструктивные параметры.

6.1. Для грузовых электромобилей рекомендовано установить:

Li-ion батареи фирмы EnerZ емкостью 140 Ач, масса комплекта батарей составит 600 кг, передаточное число редуктора 1,92, или Li-ion батареи с массой одной единицы 6,2 кг и емкостью 170 Ач;

6.2. Для динамичных электромобилей рекомендовано установить Li-ion батареи фирмы EnerZ емкостью 140 Ач, масса комплекта батарей составит 600 кг, с передаточным числом редуктора 2,36, или Li-ion батареи с массой одной единицы 6,1 кг и емкостью 150 Ач;

6.3. Для пассажирских модификаций – Ni-Mh батареи фирмы НИАИ ИСТОЧНИК емкостью 100 Ач, масса комплекта батарей равна 650 кг, передаточное число редуктора 1,7, или Ni-Mh батареи с массой одной единицы 2 кг и емкостью 100 Ач;

7. На основании проведенных экспериментов установлено, что расхождение результатов расчета и экспериментальных данных для энергетических свойств не превышает 26 %, для тягово-скоростных свойств – 12%. Этим подтверждается достоверность основных теоретических положений, принятых допущений и гипотез при составлении математической модели.

8. Результаты работы внедрены в ОИЦ ГАЗ при разработке и исследовании электромобиля ГАЗель-Next Electro по заказу фирмы СпецАвтоИнжиниринг для транспортировки специального оборудования и обслуживающего персонала в черте города и в пригороде, и используются в учебном процессе на кафедре «Автомобили и тракторы» НГТУ им. Р. Е. Алексеева.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации научных результатов кандидатских диссертаций:

1. **Козлова Т. А.** Методика поиска рациональных конструктивных параметров тягового привода электромобиля. Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №15 (2016)
2. Блохин А. Н., Грошев А. М., **Козлова Т. А.**, Яржемский А. Д., Серопян М. С. Результаты теоретических и экспериментальных исследований электромобиля на шасси «ГАЗель». Наука и образование №12 2012г.

Публикации в прочих изданиях:

3. Blokhin Alexander, Yarzhemsky Alexey, **Kozlova Tatyana**, Shatilov Alexey. THE RESEARCH OF INDEXES OF OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF ELECTRIC LCV // FISITA - World Automotive Congress 2014- F2014 - EPT- 026
4. Блохин А. Н., **Козлова Т. А.** Исследование эксплуатационных свойств городского автобуса большого класса с гибридной силовой установкой на базе ЛИАЗ 6213 // Материалы 79-й Международной научно-технической конференции ААИ – Н. Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2012 – 347 с.
5. Блохин А. Н., **Козлова Т. А.** Разработка методики поиска рациональных значений конструктивных параметров тягового привода электромобиля в соответствии с его оперативно-функциональным назначением // Материалы XV Международной научно-технической конференции «Будущее технической науки» – Н.Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2016 – 250 с;
6. **Козлова Т. А.** Анализ методик расчета конструктивных параметров электромобиля // Международное научное периодическое издание по итогам Международной научно-практической конференции (04 сентября 2016 г, г. Ижевск) «Новая наука: теоретический и практический взгляд» – Стерлитамак: АМИ, 2016 – 249.