

На правах рукописи

Зар Ни Лин

**ПОВЫШЕНИЕ ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ЛЕГКОВОГО
АВТОМОБИЛЯ ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ АЛГОРИТМА
УПРАВЛЕНИЯ ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ**

Специальность 2.5.11. Наземные транспортно-технологические
средства и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена на кафедре колесных машин и прикладной механики Калужского филиала федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель:

Сидоров Владимир Николаевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Колесные машины и прикладная механика» Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Официальные оппоненты:

Аджиманбетов Султанхан Багатович

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Техника и технология наземного транспорта» ФГБОУ ВО «Горский государственный аграрный университет».

Умницын Артём Алексеевич

кандидат технических наук, инженер-программист 1 категории отдела Интеллектуальных систем помощи водителю ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ».

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева».

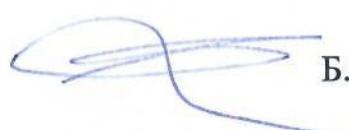
Защита состоится «3» июня 2024 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета 24.2.331.13 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.331.13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на официальном сайте МГТУ им. Н.Э. Баумана: www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «___» 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., доцент



Б.Б. Косицын

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Быстрый рост автомобильного парка в мире, в том числе в России, с одновременным увеличением цен на топливо заставляет обратить внимание на снижение автомобилем расхода топлива. Совершенствование в последнее время конструкции автомобилей с двигателями внутреннего сгорания позволило значительно повысить его экономичность при движении на трассе с постоянной скоростью. Однако при движении в режиме городского цикла потребление топлива автомобилем остается значительным, так как применяемый на автомобилях двигатель внутреннего сгорания в городских условиях работает на переменных режимах, что и приводит к перерасходу топлива.

Одним из путей решения данной задачи является применение электромеханических трансмиссий, позволяющих снизить расход топлива автомобилем в условиях городского ездового цикла за счет оптимизации совместной работы двигателя внутреннего сгорания, тягового электродвигателя, а также тягового генератора в том числе в режимах рекуперации энергии.

Для оптимизации алгоритмов управления совместной работы двигателя внутреннего сгорания и электромашин необходимо учитывать режимы движения гибридного автомобиля в условиях городского ездового цикла, максимально соответствующего реальному. Применяемые при испытаниях стандартные ездовые циклы не отражают условий движения автомобилей для конкретных городов.

В связи с этим исследования в области повышения топливной экономичности легкового автомобиля за счет совершенствования алгоритмов управления гибридной силовой установкой в условиях городского ездового цикла максимально соответствующему его реальным условиям движения актуальны.

Целью диссертационной работы является повышение топливной экономичности гибридного автомобиля за счет оптимизации алгоритма управления гибридной силовой установкой с учетом городского ездового цикла, максимально соответствующего реальным условиям движения.

Для достижения цели исследования сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Обоснованы параметры и алгоритм управления гибридной силовой установкой, обеспечивающие снижение расхода топлива в условиях городского ездового цикла;

2. Разработана математическая модель динамики автомобиля с гибридной силовой установкой пригодная для оптимизации ее алгоритма управления, позволяющего снизить расход топлива в конкретных условиях эксплуатации;

3. Разработана методика формирования ездового цикла, адаптивного к условиям реальной эксплуатации с учетом текущего маршрута движения и его загруженности;

4. Разработан метод определения оптимальных параметров алгоритма управления гибридной силовой установкой, позволяющий обеспечивать

снижение расхода топлива автомобилем с учетом реального ездового цикла, и отличающийся возможностью корректировки параметров алгоритма в зависимости от текущего маршрута движения и его загруженности с использованием GPS координат.

5. Проведены экспериментальная и экономическая оценка эффективности применения разработанного алгоритма управления гибридной силовой установкой на примере автомобиля УАЗ-3153.

Научная новизна работы.

1. Разработан и научно обоснован алгоритм управления гибридной силовой установкой, позволяющий обеспечивать снижение расхода топлива автомобилем с учетом реального ездового цикла;

2. Разработана расчетно-экспериментальная методика формирования типового городского ездового цикла, отличающаяся применением микропоездок (фаз движения), адаптивных к условиям реальной эксплуатации с учетом текущего маршрута движения и его загруженности;

3. Разработан метод определения оптимальных параметров алгоритма управления гибридной силовой установкой, позволяющий обеспечивать снижение расхода топлива автомобилем с учетом реального ездового цикла, и отличающейся возможностью корректировки параметров алгоритма в зависимости от текущего маршрута движения и его загруженности с использованием GPS координат.

4. Получены новые результаты теоретических исследований режимов работы параллельной гибридной силовой установки и эффективности предлагаемого подхода к выбору рациональных параметров алгоритма ее управления в условиях реального ездового цикла на примере г. Калуги.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов базируется на теоретических и экспериментальных исследованиях динамики колесных машин, а также на использовании апробированных методов имитационного математического моделирования.

Практическая значимость заключается:

1. В программной реализации математической модели автомобиля пригодной для исследования и сравнительной оценки различных алгоритмов управления гибридной силовой установкой в условиях городского ездового цикла на предприятиях транспортного машиностроения;

2. В программной реализации алгоритма управления гибридной силовой установкой в условиях городского ездового цикла, учитывающего текущий маршрут движения и его загруженность для использования на предприятиях транспортного машиностроения.

Реализация результатов работы. Результаты работы внедрены в АО «Научно-производственная фирма «Сигма» и ООО «Научно-производственный центр «Калугатрактсельмаш», а также используются в учебном процессе на кафедре колесных машин и прикладной механики Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана, что подтверждается соответствующими актами.

На защиту выносятся основные положения научной новизны, выводы и результаты исследований:

1. Алгоритм управления гибридной силовой установкой, позволяющий обеспечивать снижение расхода топлива автомобилем с учетом реального ездового цикла;

2. Расчетно-экспериментальная методика формирования типового городского ездового цикла, отличающаяся применением микропоездок (фаз движения), адаптивных к условиям реальной эксплуатации с учетом текущего маршрута движения и его загруженности на примере города Калуги;

3. Метод определения оптимальных параметров алгоритма управления гибридной силовой установкой, позволяющий обеспечивать снижение расхода топлива автомобилем с учетом реального ездового цикла, и отличающийся возможностью корректировки параметров алгоритма в зависимости от текущего маршрута движения и его загруженности с использованием GPS координат;

4. Основные результаты и выводы по работе.

Личный вклад автора состоит в том, что представленные результаты получены автором лично или при его непосредственном участии. Автором лично разработаны математическая модель, расчетно-экспериментальная методика формирования типового городского ездового цикла, адаптивного к условиям реальной эксплуатации с учетом текущего маршрута движения и его загруженности на примере города Калуги, а также выполнена комплексная оценка эффективности и работоспособности разработанного алгоритма управления гибридной силовой установкой, позволяющего обеспечивать снижение расхода топлива в условиях реального ездового городского цикла.

Апробация работы. Результаты и выводы диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно - технических конференциях Калужского филиала МГТУ им. Н. Э. Баумана в (Калуга, 2019-2023), Всероссийской научной конференции Юго-Западного государственного университета (Курск, 2020), Международной научно-практической конференции Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева (Орёл, 2023).

Публикации. Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в 14 научных работах, в том числе по перечню научных изданий, рекомендованных ВАК - 4, в том числе по специальности - 2, индексируемых в международной базе научных изданий SCOPUS - 3.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих результатов и выводов, списка литературы. Работа изложена на 145 листах машинного текста, содержит 84 рисунков и 32 таблиц. Список литературы содержит 176 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, научная новизна, а также основные положения, выносимые на защиту.

В Главе 1 выполнен анализ узлов и агрегатов, применяемых в трансмиссиях гибридных автомобилей. Проведен анализ классификаций гибридных автомобилей. Выявлены основные типы гибридных электромеханических

трансмиссий: последовательная, параллельная, и последовательно-параллельная.

Проведен анализ используемых в мире ездовых циклов, которые разделены на три группы: европейские, американские и японские. Самыми распространенными и используемыми являются Европейский NEDC (модальный) и Американский ездовой цикл FTP-75 (неустановившийся). Выявлено, что в большинстве развитых стран мира применяются несколько стандартных ездовых циклов, которые предназначены для оценки топливной экономичности и экологических качеств автомобиля в различных типичных условиях. Причем порядок и условия применения разных ездовых циклов даже в пределах одной страны существенно различаются, происходит постоянное обновление и замена устаревших циклов. Это связано с тем, что условия движения в городской среде довольно быстро изменяются с течением времени.

В настоящее время ведутся работы над сокращением времени и затрат для получения типичных ездовых циклов, соответствующих заданным условиям движения. Так, лаборатория EPA (США) впервые при разработке циклов использовала электронную базу данных элементарных составляющих циклов или фаз движения автомобиля, полученных экспериментально. Европейские ученые первыми использовали кластерный анализ и цепи Маркова при синтезе ездового цикла. Выявлено, что рассмотренные методики не позволяют рассчитывать типовые городские ездовые циклы на основе базовых микропоездок (фаз движения) путем добавления поправочных коэффициентов, учитывающих особенности его загрузки.

Проведен анализ алгоритмов управления гибридными трансмиссиями для городских ездовых циклов. Выявлены общие признаки алгоритмов управления гибридными трансмиссиями: выключение ДВС на стоянках, трогание в электрорежиме, рекуперация энергии торможения. При этом в известных подходах отсутствует оптимизация алгоритма управления гибридной трансмиссией для достижения минимального расхода топлива с учетом типового городского ездового цикла, адаптивного к условиям реальной эксплуатации с учетом текущего маршрута движения и его загруженности.

В Главе 2 предложена расчетно-экспериментальная методика, в которой проведена схематизация типовых маршрутов движения автомобиля в условиях реального города по количеству светофоров, пешеходных переходов, по расстоянию между ними (Рис. 1).

Ездовой цикл, записанный в утреннее безлюдное время, соответствующий низкой степени загруженности трафиком, принимался за базовый на данном маршруте. Для ездовых циклов, описывающих режим движения машины на данном маршруте, в другое время суток определялись поправочные коэффициенты, учитывающие степень загрузки маршрута. Для корректировки базового городского ездового цикла предложены поправочные коэффициенты: для трафика со средней загрузкой -1,2 и для высокой загрузки – 1,27. Для определения необходимой средней скорости движения для данной загрузки маршрута, значение скорости движения V_L , определенной как среднее для базового городского ездового цикла, делится на соответствующий коэффициент.

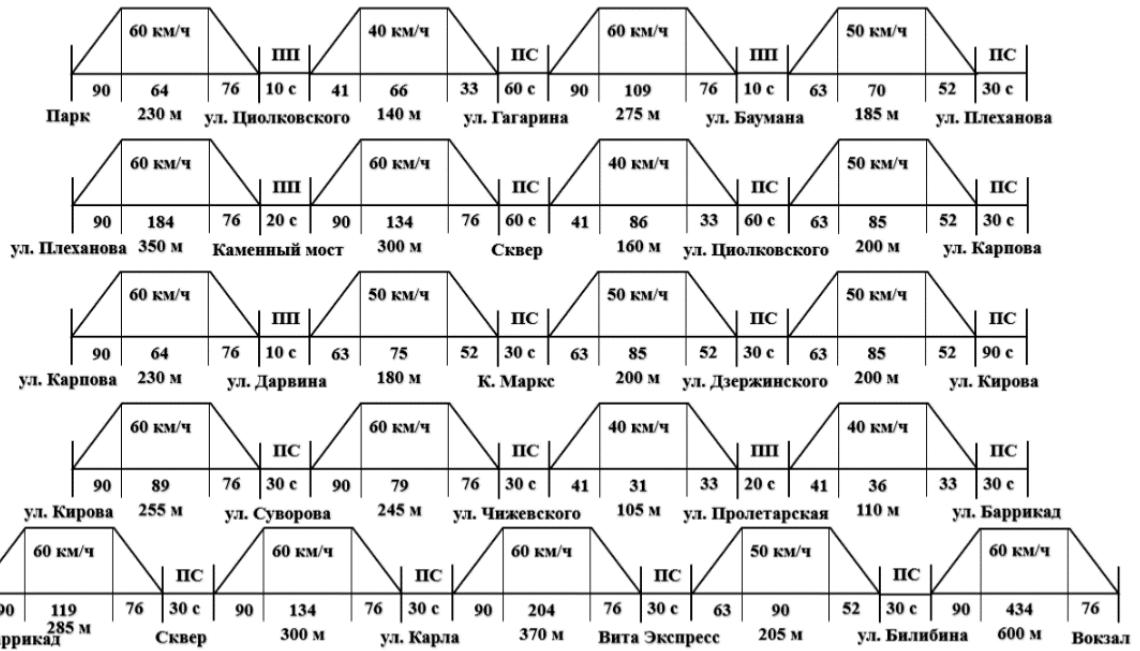


Рис. 1. Схематизация одного из типовых маршрутов движения в городе Калуга

Расчетный городской ездовой цикл на примере города Калуги использовался как компонент имитационной модели в виде скоростного профиля в блоке 1 «Ездовой цикл» (Рис. 2).

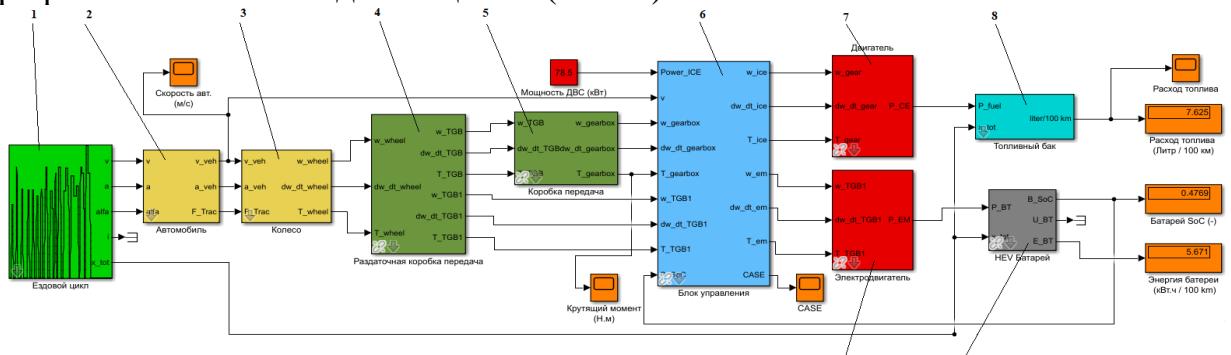


Рис.2. Структурная схема имитационной модели автомобиля с гибридной трансмиссией с учетом городского ездового цикла:

- 1 - блок «Ездовой цикл»;
- 2 - блок «Продольная динамика автомобиля»;
- 3 - блок «Колесо»;
- 4 - блок «Раздаточная коробка»;
- 5 - блок «Коробка передач»;
- 6 - блок «Алгоритм управления гибридной трансмиссией»;
- 7 - блок «Двигатель внутреннего сгорания»;
- 8 - блок «Расход топлива»;
- 9 - блок «Электродвигатель»;
- 10 - блок «Накопитель электрической энергии»

Блок 2 «Продольная динамика автомобиля» предназначен для определения суммарной силы сопротивления $P_{\text{км}}$ движению транспортного средства, в нем реализована система уравнений:

$$P_{\text{км}} = P_f + P_W + P_{\text{мх}} + P_{\text{ин}} \quad (1)$$

$$P_W = 0,5 \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot F_{\text{лоб}} \cdot v_{\text{мх}}^2 \quad (2)$$

$$P_f = f \cdot m_a \cdot g \cdot \cos(\alpha) \quad (3)$$

$$P_{\text{мх}} = m_a \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (4)$$

$$P_{\text{ин}} = \delta_{\text{вр}} \cdot m_a \cdot a_{\text{мх}} \quad (5)$$

где P_f - сила сопротивления качению; P_W - сила сопротивления воздушной среды; $P_{ин}$ - сила инерции; $P_{мх}$ - сила сопротивлению подъему; c_w - коэффициент обтекаемости; $F_{лоб}$ - площадь лобового сечения, m^2 ; $v_{мх}$ - скорость автомобиля, m/c ; ρ_w - плотность воздуха, kg/m^3 ; m_a - масса автомобиля, кг; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ - ускорение свободного падения; f - коэффициент сопротивления качению; α - угол уклона дороги; $a_{мх}$ - ускорение автомобиля, m/c^2 ; $\delta_{бр}$ - коэффициент учета вращающихся масс двигателя, трансмиссии и колес.

Блок 3 «Колесо» предназначен для определения параметров колеса, в нем реализована система уравнений:

$$\omega_k = v_{mx}/r_k \quad (6)$$

$$\varepsilon_k = a_{mx}/r_k \quad (7)$$

$$M_k = P_{km} \cdot r_k \quad (8)$$

где ω_k - угловая скорость колес, rad/c ; ε_k - угловое ускорение колеса, rad/c^2 ; M_k - суммарный крутящий момент на колесах, Nm ; r_k - радиус качения колеса без скольжения, m .

Блок 4 «Раздаточная коробка» предназначен для определения параметров на выходном валу коробки передач и валу привода электродвигателя, в нем реализована система уравнений:

$$\omega_{вкп} = u_{gl} \cdot \omega_k \quad (9)$$

$$\varepsilon_{вкп} = u_{gl} \cdot \varepsilon_k \quad (10)$$

$$\omega_{эд} = u_{gp} \cdot u_{ркп} \cdot \omega_k \quad (11)$$

$$\varepsilon_{эд} = u_{gp} \cdot u_{ркп} \cdot \varepsilon_k \quad (12)$$

$$M_{вкп} = M_k / (u_{gl} \cdot \eta_{gl}) \quad (13)$$

$$M_{вэд.гэ} = M_{вкп} - M_{дв} \cdot u_{кп} \cdot \eta_{кп} \quad (14)$$

$$M_{вэд.гг} = M_{вкп} - M_{дв} \cdot u_{кп} \cdot \eta_{кп} \quad (15)$$

где $\omega_{вкп}$ - угловая скорость выходного вала коробки передач, rad/c ; $\varepsilon_{вкп}$ - угловое ускорение выходного вала коробки передач, rad/c^2 ; u_{gl} - передаточное число главной передачи; η_{gl} - КПД главной передачи; $u_{ркп}$ - передаточное число раздаточной коробки передач; $\eta_{ркп}$ - КПД раздаточной коробки передач; $\omega_{эд}$ - угловая скорость вала привода электродвигателя, rad/c ; $\varepsilon_{эд}$ - угловое ускорение вала привода электродвигателя, rad/c^2 ; $M_{дв}$ - момент, создаваемый ДВС; $M_{вкп}$ - момент сопротивления на выходном валу коробки передач, Nm ; $M_{вэд.э}$ - момент сопротивления на валу привода электродвигателя в режиме работы только электродвигателя, Nm ; $M_{вэд.гэ}$ - момент сопротивления на валу привода электродвигателя в режиме гибрида при работе ДВС и электродвигателя, Nm ; $M_{вэд.гг}$ - крутящий момент вала привода электродвигателя в режиме гибрида при работе ДВС и электродвигателя в режиме генератора, Nm .

Блок 5 «Коробка передач» предназначен для определения параметров на валу муфты сцепления, в нем реализована системой уравнений:

$$\omega_{mc} = u_{кп} \cdot \omega_{вкп} \quad (16)$$

$$\varepsilon_{mc} = u_{кп} \cdot \varepsilon_{вкп} \quad (17)$$

$$M_{mc} = (M_{вкп} - M_{вэд.гэ}) / (u_{кп} \cdot \eta_{кп}) \quad (18)$$

где $\omega_{\text{тр}}$ - угловая скорость вала муфты сцепления, рад/с; $\varepsilon_{\text{тр}}$ - угловое ускорение вала муфты сцепления, рад/с²; $i_{\text{тр}}$ – передаточное число механической части трансмиссии; $\eta_{\text{тр}}$ – КПД трансмиссии; M_{mc} - момент сопротивления на валу муфты сцепления.

Блок 7 «Двигатель внутреннего сгорания» предназначен для определения значения эффективной мощности двигателя по выражению:

$$N_{\text{дв}} = G_{\text{T}} \cdot H_u \quad (19)$$

где $N_{\text{дв}}$ - эффективная мощность двигателя; G_{T} - часовой расход топлива, кг/ч; H_u - низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг.

Часовой расход топлива в блоке «Двигатель внутреннего сгорания» определяется табличным способом на основе двухмерной карты потребления в зависимости от потребности в крутящем моменте и угловой скорости, которые находятся по выражениям:

$$\omega_{\text{дв}} = \omega_{\text{mc}}, \quad (20)$$

$$M_{\text{дв}} = M_{\text{mc}} \quad (21)$$

где $\omega_{\text{дв}}$ - угловая скорость двигателя; $\varepsilon_{\text{дв}}$ - угловое ускорение двигателя.

Блок 8 «Расход топлива» предназначен для определения расхода топлива л/100 км пути:

$$Q_S = \frac{G_{\text{T}} \cdot 10^5}{v_{\text{м}} \cdot \rho_{\text{T}}} \quad (22)$$

где ρ_{T} – плотность топлива, кг/л.

Блок 9 «Электродвигатель» предназначен для определения мощности электродвигателя в режимах двигателя и генератора с использование следующих выражений:

$$N_{\text{эд}} = \omega_{\text{эд}} \cdot M_{\text{эд}} / \eta_{\text{эд}} \quad (23)$$

$$N_{\text{ег}} = \eta_{\text{эд}} \cdot \omega_{\text{эд}} \cdot M_{\text{эд}} \quad (24)$$

$$M_{\text{эд}} = M_{\text{вэд}} + J_{\text{эд}} \varepsilon_{\text{эд}}, \quad (25)$$

где $N_{\text{эд}}$ и $N_{\text{ег}}$ - мощность электродвигателя в режиме электродвигателя и генератора соответственно; $M_{\text{эд}}$ – крутящий момент электродвигателя; $\eta_{\text{эд}}$ – КПД электродвигателя; $J_{\text{эд}}$ – момент инерции электродвигателя, г · м².

Блок 10 «Накопитель электрической энергии» предназначен для определения расхода энергии аккумулятора E_S , Вт·ч/100 км и степени разрядки аккумуляторов с использование следующих выражений:

$$E_S = \frac{E_B \cdot 10^5}{S}; \quad (26)$$

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}_0 - \frac{C_n(t)}{C_0}; \quad (27)$$

$$C_n(t) = \frac{1}{3600} \cdot \int_{t_i}^{t_i + \Delta t} I_c(t) dt, \quad (28)$$

где C_0 – максимальная емкость ячейки, Ач; C_n – текущая емкость ячейки, Ач; I_c – ток нагрузки заряда/разряда ячейки, который имеет положительное значение во время заряда и отрицательное во время разряда аккумулятора, А; t – действительное время разряда батареи, ч; S – путь движения, м, E_B – расход энергии аккумулятора за пройденный путь, кВт·ч.

В имитационной модели имеется блок 5 «Алгоритм управления гибридной трансмиссией» (Рис. 2), в котором заложен алгоритм управления (Рис. 3).

Алгоритм управления гибридной трансмиссией заключается в обеспечении энергоэффективности автомобиля за счет рационального подключения ДВС, или тягового электродвигателя, или перехода его в режим генератора с учетом степени зарядки накопителей энергии. Обозначение режимов: STOP – автомобиль не двигается; REGEN и NO_REGEN – включено или выключено рекуперативное торможение; EV – работает только электромотор (ЭМ); ICE – работает только ДВС; HYBRID: CD – работают ДВС и ЭМ; CS – работают ДВС и ЭМ в режиме генератора.

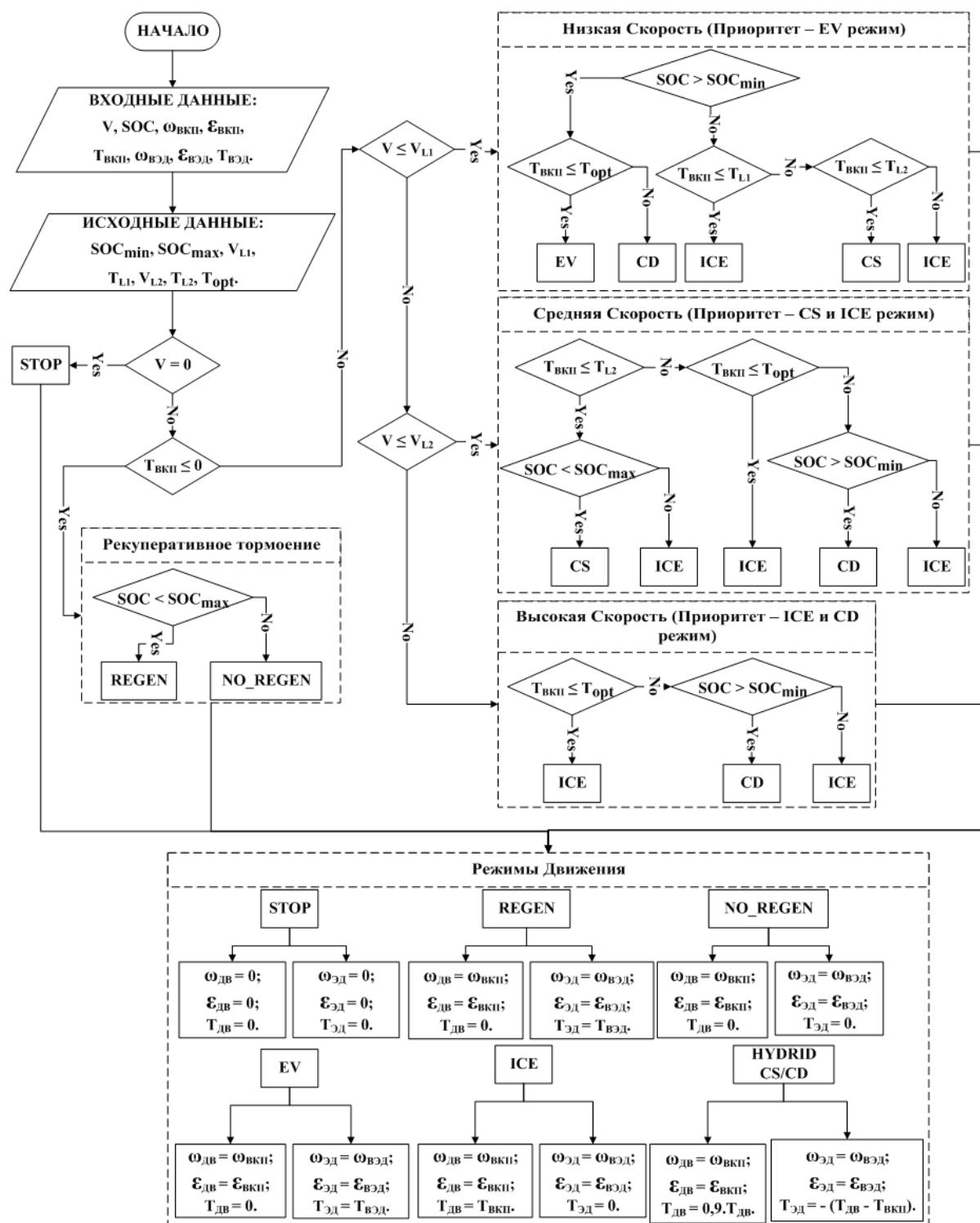


Рис. 3. Алгоритм управления гибридной трансмиссией

Входные данные: V – текущая скорость автомобиля; SOC – текущая степень зарядки аккумуляторов; $\omega_{\text{вкп}}, \varepsilon_{\text{вкп}}, M_{\text{вкп}}$ – угловые скорость и ускорение, момент сопротивления на выходном валу коробки передач, и $\omega_{\text{эд}}, \varepsilon_{\text{эд}}, M_{\text{вэд.э}}$ – угловые скорость и ускорение, момент сопротивления вала электродвигателя. Для управления переключением режимов в программе-алгоритме блока «Алгоритм управления гибридной трансмиссией» применяются по два пороговых значения скоростей движения автомобиля V_{L1} и V_{L2} и момент сопротивления на выходном валу коробки передач T_{L1} и T_{L2} .

Значения пороговых скорости движения автомобиля V_{L2} и крутящего момента на валу муфты сцепления T_{L2} задаются исходя из средних скоростей и крутящих моментов в применяемом ездовом цикле. Значения пороговых скорости включения ДВС V_{L1} и крутящего момента T_{L1} зависят от значений V_{L2} и T_{L2} и рассчитываются в программе-алгоритме с использованием следующих зависимостей:

$$T_{L1} = \min(T_{L2}, T_{L2} \cdot (SOC - SOC_{\min}) / (SOC_{\max} - SOC_{\min})); \quad (29)$$

$$V_{L1} = \min(V_{L2}, V_{L2} \cdot (SOC - SOC_{\min}) / (SOC_{\max} - SOC_{\min})), \quad (30)$$

где SOC , SOC_{\min} и SOC_{\max} – текущая степень, минимальная и максимальная зарядки аккумуляторов соответственно.

В режиме начала движения автомобиля возможны два варианта в зависимости от текущей степени зарядки накопителей SOC . При SOC меньше минимально допустимой зарядки накопителя SOC_{\min} штатным стартером запускается ДВС и начало движения автомобиля происходит за счет ДВС (режим «ICE»). При преодолении значения входного момента сопротивления на выходном валу коробки передач равного T_{L1} подключается электродвигатель в режиме генератора (режим «CS»). При SOC больше минимально допустимой зарядки накопителя SOC_{\min} начало движения автомобиля происходит за счет электродвигателя (режим «EV») до пороговой скорости V_{L1} или превышения входного момента сопротивления на выходном валу коробки передач больше T_{L2} происходит запуск ДВС и совместная его работа с электродвигателем (режим «HYBRID: CD»).

При движении автомобиля от пороговой скорости V_{L1} до пороговой скорости движения V_{L2} продолжается совместная работа электродвигателя с ДВС (режим «HYBRID: CD»), если входной момент сопротивления на выходном валу коробки передач больше порогового значения T_{L2} , и SOC , больше SOC_{\min} , если SOC , меньше SOC_{\min} работает только ДВС (режим «ICE»). Если значение входного момента сопротивления на выходном валу коробки передач лежит между пороговыми значениями T_{L1} и T_{L2} и SOC меньше SOC_{\max} , электродвигатель переходит в режим генератора (режим «HYBRID: CS»). При достижении значения SOC больше SOC_{\max} , а входной момент сопротивления на выходном валу коробки передач меньше порогового значения T_{L2} , работает только ДВС (режим «ICE»).

В режиме движения автомобиля со скоростью больше пороговой скорости движения V_{L2} при входном моменте сопротивления на выходном валу коробки передач больше T_{L2} при SOC больше SOC_{\min} , обеспечивается дополнительное

подключение электродвигателя для преодоления кратковременной перегрузки (режим «HYBRID: CD»), а если SOC меньше SOC_{min}, электродвигатель отключается (режим «ICE»). Если входной момент сопротивления на выходном валу коробки передач меньше T_{L2}, работает только ДВС (режим «ICE»). включается; если T_{L2} превышен, и SOC, больше SOC_{min}, режим «CD» продолжается, а если SOC, меньше SOC_{min}, режим «ICE» включается.

Режим замедления и торможения. При нажатии водителем на педаль тормоза электродвигатель переводится в режим генератора притормаживает автомобиль, направляя избыток энергии в накопитель (режим «REGEN»). Если степь зарядки накопителей SOC больше SOC_{max} генератор отключается (режим «NO_REGEN») и происходит торможение рабочей тормозной системой автомобиля. При экстренном торможении (зависит от степени нажатия на педаль тормоза) срабатывает тормозная система автомобиля.

Результаты имитационного моделирования приведены в 4 главе.

В Главе 3 приведены программа и методика экспериментальных исследований.

Методика сбора данных для составления фаз движения типичного городского езового цикла включает выбор типовых маршрутов движения, сбор статистических данных о изменении скоростного режима движения на типовых маршрутах и степени их загрузки (Рис. 4).



Рис.4. Блок-схема разработки типового городского езового цикла

На основе статистических данных для различных маршрутов и степени их загрузки, моделируются микропоездки (фазы движения) с учетом схематизации типовых маршрутов движения автомобиля, которые затем группируются в три кластера с использованием подхода кластеризации k-средних: перегруженного, среднего и свободного трафика. Кластеры, представляющие из себя элементы синтезируемого езового цикла, группируются с помощью цепей Маркова. Для выделения элементов езового цикла с учетом загрузки маршрутов и последующей их обработкой использовалась разработанная автором программа в среде «MatLab».

Для проверки адекватности модели были проведены лабораторные исследования на автомобильном стенде с беговыми барабанами, в рамках

которого имитировалось движение машины по различным городским ездовым циклам. Для проведения лабораторных исследований использовался созданный на кафедре «Автомобили» МГТУ «МАМИ» экспериментальный образец автомобиля с параллельной ГСУ на агрегатах автомобиля УАЗ-3153 (Рис. 5).

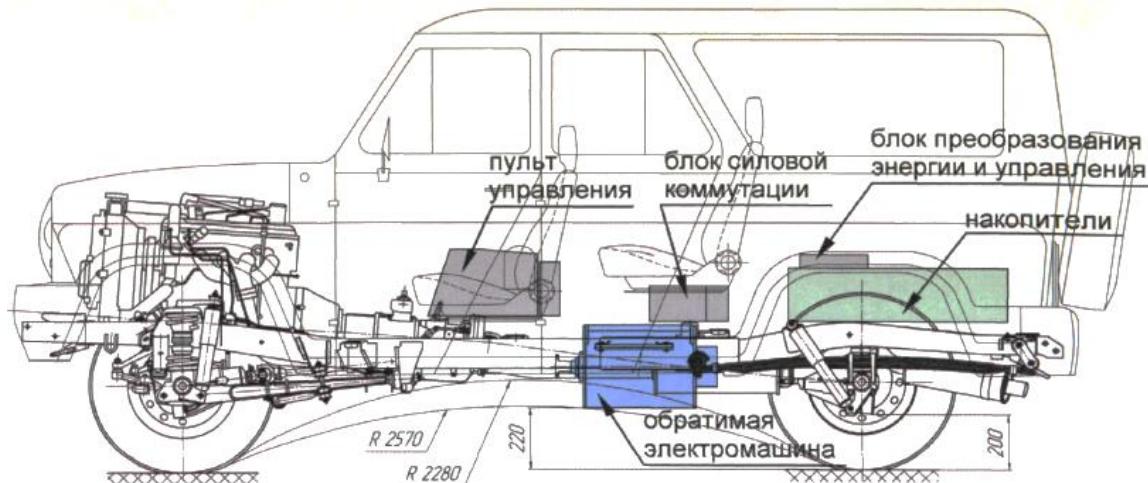


Рис. 5. Шасси экспериментального автомобиля с ГСУ, созданный на кафедре «Автомобили» МГТУ «МАМИ»

Приведены программа и методика экспериментальных исследований.

В Главе 4 приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований.

Расчетно-экспериментальным методом был построен городской ездовой цикл с учетом маршрутов движения и их загрузки на примере города Калуги. Для его проверки были исследованы режимы движения и получен ездовой цикл на основе экспериментальных данных (Таблица 1).

Таблица 1.
Сравнение экспериментального и расчетного ездовых циклов

Ездовой цикла	Время, с	Длительность, км	Средняя скорость, км/ч	Максимальная скорость, км/ч	Время холостого хода, с
Рачетный	1079	6,97	23,30	60	321
Экспериментальный	1079	6,97	23,29	60	320
Прогрешность, %	-	-	0,04	-	0,31

Расчетный цикл был наложен на экспериментальный ездовой цикл (Рис.6). Анализ данных таблицы 1 и графиков ездовых циклов (Рис. 6) позволяет сделать вывод о высокой сходимости результатов расчетного и экспериментального ездовых циклов составила менее 1%, расхождения пиковых значений скорости достигала 16%.

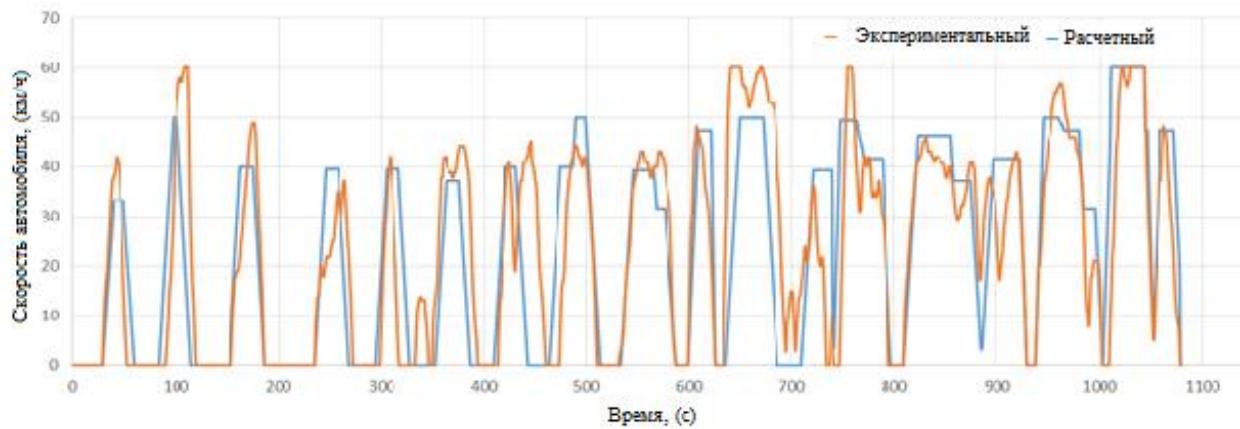


Рис. 6. Экспериментальный и расчетный ездовые циклы г. Калуги

Было проведено сравнение полученного ездового цикла г. Калуги с некоторыми другими известными ездовыми циклами FTP-75, NEDC, ECE и J10-15. Для сравнения были выбраны продолжительность цикла, диапазон движения, средняя скорость, максимальная скорость и время холостого хода (Таблица 2).

Таблица 2.

Сравнение ездового цикла Калуги с другими ездовыми циклами

Ездовой цикл	Продолжительность, с	Диапазон движения, км	Максимальная скорость, км/ч	Средняя скорость, км/ч	Время холостого хода, %
Калуга (расчетный)	1079	6,97	60	23,30	29,75
FTP-75	2477	17,67	90,72	25,67	38,8
NEDC	1225	10,87	119,30	31,91	27,67
ECE	195	0,99	49,71	18,06	33,33
J10-15	660	4,14	69,56	22,55	32,58

Время движения по маршруту, расстояние, максимальная и средняя скорости разработанного ездового цикла ниже, чем у ездовых циклов NEDC и FTP от 56,0% до 153,5%; от 51,2% до 98,8%; и от 10,2% до 37,0% соответственно. Время холостого хода ездового цикла города Калуги больше на 7,0%, чем у ездового цикла NEDC, а у остальных меньше от 9,5% до 30,4%.

Таким образом, было получено подтверждение, что ни один из известных ездовых циклов не соответствует реальному ездовому циклу конкретного города на примере города Калуги. Поэтому эти циклы не могут быть рекомендованы для оптимизации алгоритма управления ГСУ применительно к конкретным особенностям ездового цикла в условиях реального города.

Результаты моделирования и лабораторных испытаний на автомобильном стенде с беговыми барабанами экспериментального образца автомобиля с параллельной ГСУ на агрегатах автомобиля УАЗ-3153 для Европейского городского ездового цикла приведены в Таблице 3. Из анализа данных Таблицы 3 можно сделать вывод об адекватной работе модели, т.к. отклонения составляют менее 5%.

Таблица 3.

Результаты имитационного моделирования и стендовых испытаний

Европейский цикл (NEDC)	Автомобиль без ГСУ, л/100км	Автомобиль с ГСУ, л/100км
Результаты моделирования	15,97	10,54
Стендовые результаты	16,05	11,05
Абсолютная погрешность, (л/100км)	0,08	0,51
Относительная погрешность, (%)	0,49	4,61

Для получения оптимальных параметров алгоритма управления ГСУ в условиях реального городского ездового цикла использовался многофакторный эксперимент. В качестве факторов выбраны минимальная SOC_{min} и максимальная SOC_{max} степени зарядки аккумуляторов, пороговая скорость автомобиля V_{L2} и пороговое значение момента сопротивления на выходном валу коробки передач T_{L2} . За функцию отклика $y_1(SOC_{min}, SOC_{max}, V_{L2}, T_{L2})$ принимаем расход топлива в л/100 км пройденного пути. Интервалы варьирования факторов для базового городского ездового цикла с загрузкой, соответствующей низкой степени загруженности трафиком приведены в Таблице 4.

Таблица 4.

Значения уровней и интервалов варьирования факторов

Наименование и обозначение факторов	Уровни варьирования			Интервалы варьирования
	-1	0	+1	
Минимальная степень разрядки SOC_{min} , %	10	15	30	20
Максимальная степень разрядки SOC_{max} , %	75	82	95	20
Пороговая скорость автомобиля V_{L2} , км/ч	40	60	80	40
Пороговый момент сопротивления T_{L2} , Нм	60	80	100	40

Используя встроенную в Simulink программу Design Optimization, реализующую численную многопараметрическую оптимизацию, были получены, следующие значения факторов (Таблица 5).

Были получены оптимальные параметры алгоритма и значения расхода топлива в л/100 км пути как для ездовых циклов NEDC и FTP, так и для ездового цикла г. Калуги с учетом корректировки факторов для трафика с низким, средним и высоким уровнем загрузки (Таблица 6).

Таблица 5.

Оптимальные значения параметров

Наименование и обозначение факторов	Уровни загрузки		
	низкий	средний	высокий
Минимальная степень разрядки аккумуляторов SOC_{min} , %	18	19	20
Максимальная степень разряжки аккумуляторов SOC_{max} , %	75	79	81
Пороговая скорость автомобиля V_{L2} , км/ч	55	45	45
Пороговый момент сопротивления T_{L2} , Нм	96	89	75

Таблица 6.

Расход топлива при оптимизации алгоритма управления гибридной силовой установкой

Параметры	Городские ездовые циклы			NEDC	FTP-75		
	г. Калуги		Уровень загрузки				
	низкий	средней					
	Без оптимизации, л/100км	12,76	13,81	16,07	10,54	10,03	
После оптимизации, л/100км	11,36	12,76	14,41	7,65	7,09		
Оценка эффективности, л/100км	1,40	1,05	1,66	2,89	2,94		
Отклонение, %	10,97	7,60	10,33	27,42	29,3		

На Рисунке 7 приведен пример изменения расхода топлива при движении автомобиля по ездовому циклу характерному для г. Калуги с учетом полученных в результате оптимизации параметров алгоритма управления трансмиссией для случая высокой загруженности маршрута трафиком.

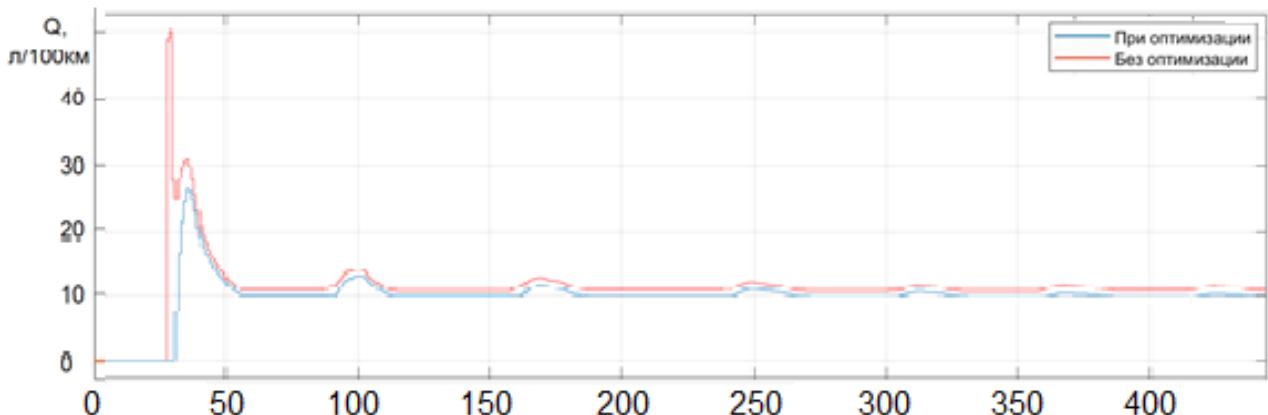


Рис. 7. Изменение расхода топлива при движении автомобиля по ездовому циклу характерному для г. Калуги при трафика с высокой степенью загрузки

Можно отметить, что оптимизация параметров алгоритма управления позволила дополнительно снизить расход топлива от 10 до 30% в зависимости от ездового цикла.

Таким образом, для снижения расхода топлива достаточно косвенно оценивая загруженность трафиком на дорогах, можно задавать параметры алгоритма управления гибридной силовой установкой, заранее рассчитанные для заданного ездового цикла. Такой подход наиболее приемлем для общественного транспорта, а также постоянных маршрутов автомобилистов типа дом – работа.

Глава 5 приводятся результаты расчета экономической эффективности применения оптимального алгоритма управления гибридной силовой установкой на примере автомобиля УАЗ-3153. Годовая экономия составила 109000 руб. на один автомобиль и срок окупаемости дополнительных капитальных вложений - 1,7 года в сравнении с базовым вариантом.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель динамики автомобиля с гибридной силовой установкой пригодная для оптимизации ее алгоритма управления, позволяющего снизить расход топлива в конкретных условиях эксплуатации. В результате верификации модели по результатам натурного эксперимента установлено, что относительная погрешность результатов моделирования и значений, полученных на стендовых испытаниях составила менее 5%.

2. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена расчетно-экспериментальная методика получения типового городского ездового цикла с возможностью его корректировки с учетом загрузки маршрута движения, основанная на автоматизированном сборе и обработке данных о режимах движения автомобилей. Для корректировки базового городского ездового цикла предложены поправочные коэффициенты скоростного режима движения: для трафика со средней загрузкой -1,2 и для высокой загрузки – 1,27. В результате сравнения, полученных при помощи указанной методики данных с результатами натурного эксперимента установлено, что отклонения расчетного и экспериментального ездовых циклов составили менее 1%, расхождения пиковых значений по максимальной скорости достигали 16%.

3. Разработан метод определения оптимальных параметров алгоритма управления параллельной гибридной силовой установкой городского автомобиля на основе имитационного моделирования для городского ездового цикла. В результате применения метода на примере экспериментального образца автомобиля с параллельной ГСУ на агрегатах автомобиля УАЗ-3153, установлено, что в зависимости от загруженности маршрутов, пороговая скорость включения ДВС, составила 25-36 км/ч, пороговый крутящий момент на выходном валу коробки передач – 112-152 Нм и степень разрядки аккумуляторов: минимальная $SOC_{min} = 0,18-0,20$ и максимальная $SOC_{max} = 0,75-0,81$ для городского ездового цикла, характерного для города Калуги.

4. Обоснован алгоритм управления параллельной гибридной силовой установкой городского автомобиля, реализация которого позволила с учетом применения метода определения оптимальных параметров, получить на опытном образце автомобиля с ГСУ при имитации реального городского ездового цикла на примере города Калуги сокращение расхода топлива дополнительно на 7,60-10,97% и на 1,05-1,66 л/100км.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ:

1. Оптимизация алгоритма управления автомобилем с гибридной силовой установкой / Зар Ни Лин[и др.] // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 1. С. 50-56. (0,81 п.л. / 0,27 п.л.).

2. Математическая модель рекуперации электрической энергии транспортного средства / Зар Ни Лин[и др.] // Вестник Российской университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 2. С. 177–

186. (1,16 п.л. / 0,29 п.л.).

3. Зар Ни Лин, Сидоров В.Н. Разработка расчетно-экспериментальной методики получения городского ездового цикла // Мир транспорта и технологических машин. 2023. № 3–5(82). С. 86-91. (0,69 п.л./ 0,34 п.л.).

4. Перспективы развития автомобилей с гибридной силовой установкой / Зар Ни Лин[и др.] // International Journal of Advanced Studiest. 2020. Т. 10. № 1. С. 67-80. (1,50 п.л. / 0,3 п.л.).

5. Lin Z.N., Sidorov V. Study of the parameters for a parallel hybrid electric vehicle // E3S Web of Conferences. 2023. 402. 04014. (1,04 п.л. / 0,26 п.л.).

6. Change in Vehicle Fuel Consumption when Using a Hybrid Powerplant / Зар Ни Лин[и др.] // AIP Conference Proceedings. 2022. 2503. 050040. (1,04 п.л. / 0,52 п.л.).

7. Tint Naing Win, Alakin V.M., Zar Ni Lin. Research to Determine the Installation of Additional Stabilizer Bars for the Modernization of Trucks // Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering. 2020. Vol. 1. P. 1119. 1130. (1,38 п.л. / 0,46 п.л.).

8. Зар Ни Лин, Чижевский К.В., Сидоров В.Н. Анализ международных ездовых циклов автомобиля // Актуальные научные исследования в современном мире. 2020. № 2-1(58). С. 109-114. (1,84 п.л. / 0,61 п.л.).

9. Методология разработки ездового цикла для города Калуги / Зар Ни Лин[и др.] // В сборнике: Молодежь и наука: шаг к успеху: сборник научных статей 4-й Всерос. науч. конф. Курск. 2020. С. 67-70. (0,46 п.л. / 0,11 п.л.).

10. Зар Ни Лин, Сидоров В.Н. Анализ европейских ездовых циклов автомобилей // Наукоемкие технологии в приboro- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе: материалы Регион. науч.-техн. конф. Калуга. 2021. Т. 2. С. 50-54. (0,57 п.л. / 0,29 п.л.).

11. Зар Ни Лин, Сидоров В.Н. Разработка ездовых циклов для легковых автомобилей // Наукоемкие технологии в приboro- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе: материалы Всерос. науч.-техн. конф. Калуга. 2020. Т. 1. С. 224-227. (0,46 п.л. / 0,23 п.л.).

12. Зар Ни Лин, Алакин В.М., Сидоров В.Н. Анализ схем компоновки гибридного автомобиля с использованием рекуперативного тормоза // Наукоемкие технологии в приboro- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе: материалы Регион. науч.-техн. конф. Калуга. 2020. Т. 2. С. 31-33. (0,35 п.л. / 0,17 п.л.).

13. Анализ международных ездовых циклов автомобиля / Зар Ни Лин[и др.] // Наукоемкие технологии в приboro- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе: материалы Всерос. науч.-техн. конф. Калуга. 2019. Т. 2. С. 4-6. (0,35 п.л. / 0,09 п.л.).

14. Зар Ни Лин, Алакин В.М., Сидоров В.Н. Исследование конструкций и принципов работы тормозов-замедлителей грузовых автомобилей // Наукоемкие технологии в приboro- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе: материалы Регион. науч.-техн. конф. Калуга. 2019. Т. 2. С. 219-226. (0,92 п.л. / 0,31 п.л.).