

На правах рукописи



**Дебелов Владимир Валентинович**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ**

Специальность: 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тольятти 2015 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Поволжский государственный университет сервиса (ПВГУС)» на кафедре «Электронный и информационный сервис».

Научный руководитель: **Козловский Владимир Николаевич**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Теоретической и общей электротехники», Самарского государственного технического университета, г. Самара

Официальные оппоненты: **Володина Надежда Алексеевна**, д.т.н., зам. директора по сертификации "Научно-исследовательского и экспериментального института автомобильной электроники и электрооборудования" (ФГУП НИИАЭ), г. Москва

**Малеев Руслан Алексеевич**, к.т.н., доцент кафедры «Автомобильная электроника» ФГБОУ ВПО «Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ)», г. Москва

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ульяновский государственный технический университет» (УлГТУ), г. Ульяновск.

Защита состоится «03» марта 2016 года, в 14:00 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.140.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ) / Университет машиностроения» по адресу: 107023, г. Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38, корпус Б, аудитория Б-303.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке «Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ) / Университета машиностроения» и на сайте [www.mami.ru](http://www.mami.ru). Текст автореферата размещен на сайте Высшей аттестационной комиссии: [www.vak.edu.gov.ru](http://www.vak.edu.gov.ru).

Автореферат разослан «\_\_»\_\_\_\_\_2015 г. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять в адрес диссертационного совета университета.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.140.01  
кандидат технических наук, доцент

Щетинин Ю.С.

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Повышение качества функционирования современного легкового автомобиля неразрывно связано с решением комплекса задач по улучшению безопасности, надежности, комфорта, экологичности при одновременном сохранении динамических характеристик. Для решения обозначенных задач мировые лидеры автопрома активно занимаются разработкой и внедрением электротехнических систем управления, которые обеспечивают их эффективное решение.

Качество функционирования автомобиля определяется рядом технических параметров, существенная часть из которых обеспечивает эффективность работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Потребитель в Западной Европе весьма требователен к вопросам топливной экономичности и вредным выбросам. Но при этом автомобиль не должен терять динамические характеристики и гарантировать высокий уровень комфорта.

Сегодня, на отечественных автомобилях активно внедряется и совершенствуется комплекс электронной педали акселератора и электронного привода дроссельной заслонки. Конструкторами разрабатывается новая система сдвига фаз газораспределения ДВС, реализуется система «Старт–стоп» и обосновываются принципы регулирования скорости легкового автомобиля.

Кроме этого, серьезной проблемой препятствующей дальнейшему развитию систем управления силовой установкой автомобиля является их модульная организация, при которой проявляется эффект децентрализации функций управления.

Использование же современных средств математического имитационного моделирования обеспечивает возможности для проведения комплексных работ, связанных с теоретическим анализом, а также проектированием сложных электротехнических систем автомобилей.

Таким образом, становится актуальной важная научно–техническая задача по разработке математических моделей новейших систем определения вязкости моторного масла, регулирования фаз газораспределения двигателя внутреннего сгорания, системы «Старт–стоп» и системы регулирования скорости движения легкового автомобиля, в режимах поддержания и ограничения скорости с оптимальными параметрами.

Большой вклад в развитие теории моделирования автомобильного электрооборудования внесли отечественные ученые: С.В. Акимов, П.В. Абрамов, С.К. Гирявец, В.А. Балагуров, В.В. Болотин, С.Я. Дунаевский, Е.В. Кононенко, И.П. Копылов, Ю.А. Купеев, А.В. Лоос, Б.И. Петленко, Г.А. Сипайлов, И.И. Трещев, М.Н. Фесенко, А.Е. Чернов, В.Е. Ютт.

**В диссертации решается научно-техническая задача**, получения наилучших показателей работы ДВС за счет применения параметра вязкости моторного масла, управления фазами газораспределения, снижения расхода топлива, уменьшения времени работы ДВС в режиме холостого хода, управления фазами газораспределения, регулирования скорости автомобиля в режимах поддержания и ограничения.

**Цель настоящей работы** состоит в разработке комплекса математических имитационных моделей электротехнических систем управления двигателем автомобиля для создания эффективной системы с единым комплексным управлением.

Для достижения поставленной в работе цели необходимо решить следующие задачи:

- рассмотреть развитие электротехнических систем управления двигателем внутреннего сгорания;
- провести анализ концепций существующих систем определения вязкости масла, системы регулирования фаз газораспределения, системы «Старт–стоп» и системы поддержания скорости автомобиля;
- разработать математические модели этих систем;
- провести экспериментальные комплексные исследования с применением математического и имитационного моделирования, а также на действующем образце легкового автомобиля, сравнить полученные результаты и дать рекомендации по применению моделей.

**Научная новизна выполненного исследования состоит в том, что:**

Предложен комплекс унифицированных имитационных математических моделей электротехнических систем управления двигателем внутреннего сгорания автомобиля, позволяющий:

1. управлять ДВС по дополнительному параметру, определяющему вязкость моторного масла;
2. повысить скорость достижения требуемого момента ДВС автомобиля, регулируя фазы газораспределения;
3. уменьшить время синхронизации положения коленчатого вала ДВС и определения момента топливоподачи и искрообразования, используя алгоритмы системы «Старт-стоп»;
4. осуществлять регулирование угла открытия дроссельной заслонки с целью поддержания заданной скорости движения непосредственно через контроллер системы управления ДВС без применения дополнительных блоков управления.

**Методы исследования.** Аналитические исследования были проведены с использованием теории автоматического управления и математического пакета MATLAB. Имитационное моделирование было проведено в программной среде Simulink. Экспериментальные данные были получены методом активного эксперимента при использовании теории планирования эксперимента. Выявленные количественные и качественные взаимосвязи между параметрами исследуемых объектов представлены в аналитическом виде и графической интерпретации. Результаты и выводы работы теоретически обоснованы и подтверждены расчетами и экспериментами.

**Практическая значимость работы заключается в том что:**

Результаты теоретических исследований представляют собой универсальный комплекс, позволяющий разрабатывать компоненты других электронных систем автомобиля, используя единый подход в реализации алгоритмов управления.

Получены программные коды для контроллера системы управления двигателем на основе разработанных математических моделей систем регулирования фаз газораспределения, «Старт–стоп» и регулирования скорости автомобиля, с применением введенного параметра вязкости масла, вычисляемого в предложенной математической модели определения вязкости масла.

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

- математическая имитационная модель системы определения вязкости масла, позволяющая повысить эффективность управления двигателем внутреннего сгорания за счет применения дополнительного параметра;
- математическая имитационная модель системы регулирования фаз газораспределения, позволяющая расширить диапазон максимального крутящего момента;
- математическая имитационная модель системы «Старт-стоп», позволяющая производить быстрый запуск двигателя с минимальными энергетическими потерями;
- математическая имитационная модель системы регулирования скорости автомобиля, обеспечивающая реализацию функций поддержания и ограничения скорости;
- результаты аналитических, расчетных и экспериментальных исследований.

#### **Апробация работы.**

Основные положения и результаты исследований докладывались на Международных и областных конференциях: «XIV Научно практическая конференция молодых специалистов ОАО АВТОВАЗ “Развитие АВТОВАЗа: Синхронизация с будущим”» (Тольятти, 2012г.); Восьмая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2015г.); «XI Международная научно-практическая конференция» (Пенза, 2011г.); «II Международная научно-практическая конференция студентов, магистрантов, аспирантов» (Тольятти, 2012г.); Международных научно-практических конференциях (Липецк, 2012г.); I международная научно-техническая конференция. Алгоритмические и программные средства в информационных технологиях, радиоэлектронике и телекоммуникациях (Тольятти, 2012г.).

Работа прошла апробацию на факультете «Информационно-технического сервиса» ФГБОУ ВПО «ПВГУС» и кафедре «Электрооборудование автомобилей и электромеханика» ФГБОУ ВПО «ТГУ».

#### **Связь работы с научными программами, темами, грантами.**

Лауреат XIV Научно-практической конференции молодых специалистов ОАО АВТОВАЗ “Развитие АВТОВАЗа: Синхронизация с будущим”.

Соисполнитель по гранту Президента России № МД-2782.2014.8 2014-2015г. «Комплекс улучшения качества и надежности продукции и услуг крупного машиностроительного предприятия».

Победитель конкурса аспирантов и молодых ученых на получение стипендии Президента РФ 2014-2015 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 18 работ общим объемом 11 п.л., из которых 13 работ в изданиях, входящих в перечень ВАК. Личный вклад 4,2 п.л.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Общий объем диссертации 150 стр. компьютерного набора, 67 рисунков, 41 таблиц, 33 стр. приложения.

## **2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** приведено обоснование актуальности диссертационного исследования, цели и задачи исследований, показана научная новизна и практическая значимость, методика исследования диссертационной работы.

**В первой главе** проведен анализ современных электронных систем управления автомобилем, сформулированы цель и задачи, решаемые в диссертационной работе.

Активное развитие электротехнических комплексов и систем управления на транспорте, которое мы наблюдаем в последние десятилетия, предопределило формирование целого пласта научно-технических разработок, обеспечивающих повышение уровня безопасности, экологичности и комфорта эксплуатации автомобилей. Высокий уровень актуальности данной темы также определяется трансформацией традиционного автомобилестроения, связанной с появлением автомобилей с комбинированной энергоустановкой, где важность систем оптимизации и управления двигателем внутреннего сгорания становится ключевой задачей процесса проектирования.

Запуск двигателя внутреннего сгорания (ДВС), управление моментом воспламенения топливно-воздушной смеси, обеспечение комфортной среды в салоне автомобиля, организация безопасного пространства внешней среды автомобиля, передача информации о маневрах автомобиля другим участникам дорожного движения, контроль работы агрегатов и узлов, а также автомобиля в целом – все это функции микропроцессорных систем управления.

Рассматривая процесс проектирования современных электротехнических комплексов, можно классифицировать его по двум категориям: разработка и отладка систем по отдельности; проектирование продукта на фундаменте общей концепции. Создание математических имитационных моделей систем и реализация их на базе общей концепции построения программно-аппаратного комплекса позволяет производить модернизацию и расширение функций электротехнических систем управления без существенных капиталовложений.

Система изменения фаз газораспределения (Variable Valve Timing, VVT) предназначена для регулирования параметров работы газораспределительного механизма в зависимости от режимов работы двигателя. Применение данной системы обеспечивает повышение мощности и крутящего момента двигателя, топливную экономичность и снижение вредных выбросов.

К регулируемым параметрам работы газораспределительного механизма относятся: момент открытия (закрытия) клапанов; продолжительность открытия клапанов; высота подъема клапанов. В совокупности эти параметры составляют фазы газораспределения – продолжительность тактов впуска и

выпуска, выраженную углом поворота коленчатого вала относительно «мертвых» точек (рис.1). Фаза газораспределения определяется формой кулачка распределительного вала, воздействующего на клапан.

Различают следующие способы изменяемых фаз газораспределения: поворот распределительного вала (являются наиболее распространенными); применение кулачков с разным профилем; изменение высоты подъема клапанов.

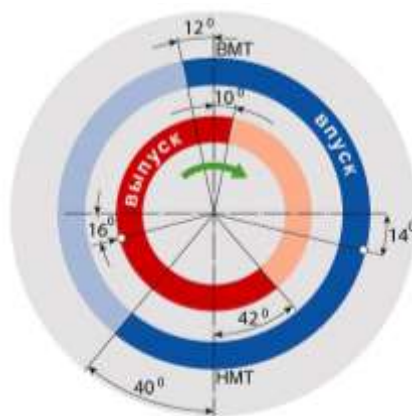


Рисунок 1 - Продолжительность фаз газораспределения

Ужесточение требований к экологическим и экономическим показателям автомобиля требует создание интеллектуальных систем, способствующих обеспечивать эффективность работы ДВС в процессе его работы. Система «Старт-стоп» предназначена для снижения вредного техногенного воздействия на окружающую среду путем оптимизации работы двигателя внутреннего сгорания, для снижения расхода топлива, повышения энергоэффективности. Достигается это сокращением времени работы двигателя в режиме холостого хода, частичной рекуперацией энергии при движении накатом или при торможении автомобиля.

Для работы системы поршни необходимо остановить в строго определенном положении, чтобы в каждом цилиндре был необходимый объем воздуха для оптимального запуска двигателя в дальнейшем. Интеллектуальная система управления двигателем контролирует положение поршней во время выключения мотора, выполняет нумерацию цилиндров и с началом движения в цилиндры впрыскивается топливо и воспламеняется топливно-воздушная смесь. Таким образом, происходит запуск двигателя. При запуске двигателя в дополнение к энергии сгорания топлива добавляется энергия стартера, который включается на непродолжительное время.

Система позволяет оптимизировать энергетический баланс автомобиля и увеличить ресурсы системы электропитания для пуска автомобиля, независимо от индивидуального характера вождения и условий его эксплуатации. Система «Старт-стоп» служит для выполнения быстрых и оптимальных пусков, в результате которых снижается количество техногенных выбросов и уменьшается время прокрутки стартером, производится подача топливовоздушной смеси с требуемым стехиометрическим соотношением.

Системы регулирования скорости, получили широкое распространение, после изобретения системы поддержания скорости, которая была

предназначена для снижения утомления водителя по удерживанию педали акселератора в одном и том же положении на большом протяжении времени движения автомобиля по прямой дороге. Эти системы получили развитие, так как способствовали повышению эффективности труда, уменьшали временные затраты на отдых водителя и способствовали сокращению времени движения транспортного средства. Созданная пассивная система поддержания скорости, предоставляла водителю ограниченные возможности. Получили развитие системы обеспечивающие регулирование открытия дроссельной заслонки на величину, требуемую для поддержания заданной скорости.

Высокий уровень актуальности, в настоящее время, приобретает задача по разработке системы управления работой ДВС по дополнительному критерию – вязкости масла. Критерий вязкости – один из ключевых характеристик моторных масел. Создание электронного вискозиметра для управления двигателем представляет собой перспективную разработку, обеспечивающую дальнейший рост эффективности работы ДВС и автомобиля в целом.

Важным аспектом в решении задач по разработке электротехнических систем управления ДВС является их интеграция в рамках единого комплекса с обеспечением возможности повышения эффективности дальнейших работ связанных с развитием, а также улучшением их взаимодействия в рамках единой концепции определяющей общность систем.

Представленная на рисунке 2 концепция программного обеспечения контроллера системы управления двигателем (КСУД) позволяет описать взаимосвязи модулей программного обеспечения и их функции, а также иерархию программного обеспечения и привязку к аппаратным ресурсами систем управления ДВС.



Рисунок 2 – Концепция архитектуры программного обеспечения КСУД

Особенностью концепции является возможность её соблюдения как в рамках одного программного продукта на уровне математических моделей с добавлением вставок программного кода, так и на базе проектов. Совместимость достигается за счет преобразований сигналов и типов величин,



а проект представляет собой элементы программного кода, полученного с помощью различных инструментов компьютерного моделирования и трансляции его в программные коды.

Проведенный анализ развития электротехнических систем управления двигателем внутреннего сгорания позволяет сформулировать цель диссертационной работы как разработка комплекса математических имитационных моделей электротехнических систем управления двигателем автомобиля для создания эффективной системы с единым комплексным управлением.

**Во второй главе** представлена математическая модель определения вязкости, основанная на движении пластины, управляемой магнитным полем, в вязкой жидкости. Математическая модель описывает динамику чувствительного элемента, заполненного диэлектрической жидкостью с учетом её плотности, вязкости, и температуры окружающей среды, демпфирующего эффекта жидкостной пленки в области перекрытия контактных деталей чувствительного элемента при их срабатывании и отпуске.

Динамические характеристики чувствительного элемента, управляемого катушкой с током, описываются системой уравнений:

$$U = iR + L \frac{di}{dt} + i \frac{dl}{dt}; \quad (1)$$

$$P_3 = -\frac{1}{2} (iN)^2 \frac{d\Lambda_n}{d\delta}; \quad (2)$$

$$P_d = (m + m') \frac{d^2x}{dt^2} + A \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + B \frac{dx}{dt} + C_x; \quad (3)$$

где  $U$  – напряжение источника питания;  $i$  – ток,  $R$  – сопротивление обмотки,  $L$  – индуктивность катушки,  $N$  – число витков обмотки управления,  $\Lambda_n$  – полная магнитная проводимость системы,  $P_3$  – электромагнитное усилие,  $m$  – приведенная масса контакт–детали,  $t$  – время,  $x$  – перемещение,  $\delta$  – текущее значение зазора,  $A$  – коэффициент гидродинамического сопротивления,  $B$  – коэффициент вязкого трения,  $C$  – жесткость контакт–детали.

Уравнение (3) использует метод присоединенных масс, и учитывает эффекты гидродинамического сопротивления жидкости при движении контакт–детали и демпфировании тонкой жидкостной пленки в области перекрытия. Здесь к массе чувствительного элемента  $m$  прибавляется “присоединенная” масса жидкости, которая находится на поверхности контакт–детали:

$$m = k_{\phi 1} \pi k_{\gamma} \gamma_{ж} (\epsilon/2)^2 \ell_u,$$

где  $\gamma_{ж}$  – плотность жидкости,  $k_{\gamma}$  – температурный коэффициент плотности жидкости,  $\epsilon$  – ширина изгибающейся части,  $\ell_u$  – длина изгибающейся части контакт–детали,  $k_{\phi 1}$  – коэффициент формы контакт–детали.

Величины  $L$ ,  $P_3$ ,  $\Lambda_n$  определяются через магнитные проводимости внешнюю  $\Lambda_{вн}$  и внутреннюю  $\Lambda_{вн}$  и параметры обмотки и геркона.

Экспериментальная установка (рис. 3) для определения вязкости моторного масла, состоит из следующих элементов: источник питания постоянного напряжения 12В; отладочная плата с микроконтроллером; катушка управления и геркон, как чувствительный элемент; макетная плата с подключенным LCD дисплеем и датчиком температуры; вспомогательная макетная плата, на которой располагается схема управления катушкой; соединительные провода.

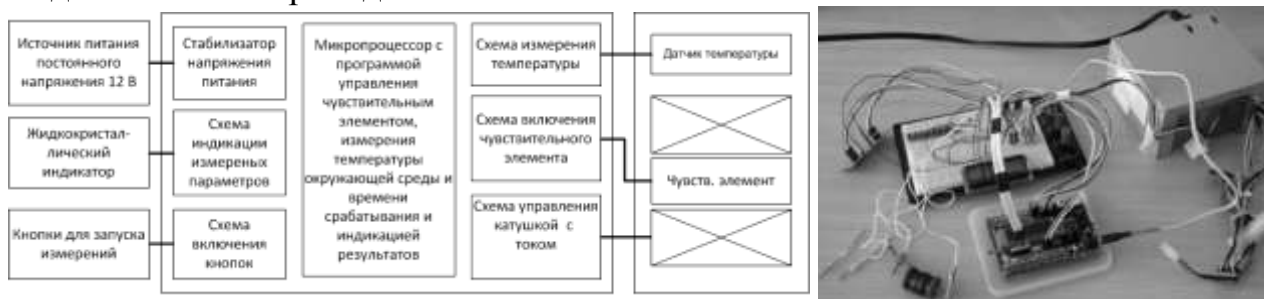


Рисунок 3 – Структурная схема и внешний вид экспериментальной установки

После проведения эксперимента были определены временные параметры срабатывания контакт-деталей при температуре 26°C окружающего воздуха.

Для определения истинного значения вязкости масла был проведен опыт на вискозиметре вибрационного типа SV-10 компании AND. Вязкость чистого моторного масла составила 1230 мПа·с.

С использованием математической модели с полученным значением вязкости было рассчитано время движения контактной группы, которое составило 3114 мкс. Погрешность измерения вязкости составила 3,8 %.

Проведен эксперимент с заполнением контактной пары чувствительного элемента отработанным моторным маслом после его эксплуатации на автомобиле. Пробег легкового автомобиля на данном масле составил 9 тыс. км.

Для определения истинного значения вязкости отработанного масла был проведен опыт на вискозиметре вибрационного типа SV-10. Вязкость чистого моторного масла составила 865 мПа·с.

Используя математическую модель с полученным значением вязкости, было рассчитано время движения контактной группы, которое составило 1663 мкс. Погрешность измерения вязкости составила 4,1 %.

Математическое и имитационное моделирование позволило установить взаимосвязь между геометрическими параметрами чувствительного элемента, силами, действующими на чувствительный элемент и вязкостью, которая является важным критерием при анализе углеводородных жидкостей. Модель описывает взаимосвязи и позволяет вычислить вязкость жидкости, способствует решению обратной задачи, подбора оптимального геометрического соотношения чувствительного элемента, и выбрать оптимальную схему управления.

После проведения экспериментов можно прийти к выводу, что метод, основанный на движении пластины в жидкости, позволяет давать количественную и качественную оценку вязкости моторного масла. Результаты измерения времени срабатывания геркона, с его различным заполнением, сходны по величине с результатами, получаемыми в математической модели.

Отклонение полученной величины составило не более 4,5 %, что позволяет сделать вывод о применимости математической модели для определения вязкости масла в минимальном объеме, в течение небольшого интервала времени.

В третьей главе представлена концепция (рис. 4) и модель системы регулирования фазами газораспределения в составе контроллера системы управления двигателем (КСУД), которая позволяет обеспечить оптимальную работу ДВС.

При моделировании системы, описан метод синхронизации двигателя с использованием аппаратных ресурсов процессора, позволяющих делать прерывание по сигналам от датчиков положения коленчатого вала и фаз (ДПКВ или ДФ), а также описан метод повышения точности синхронизации за счет применения дискретных зубьев.

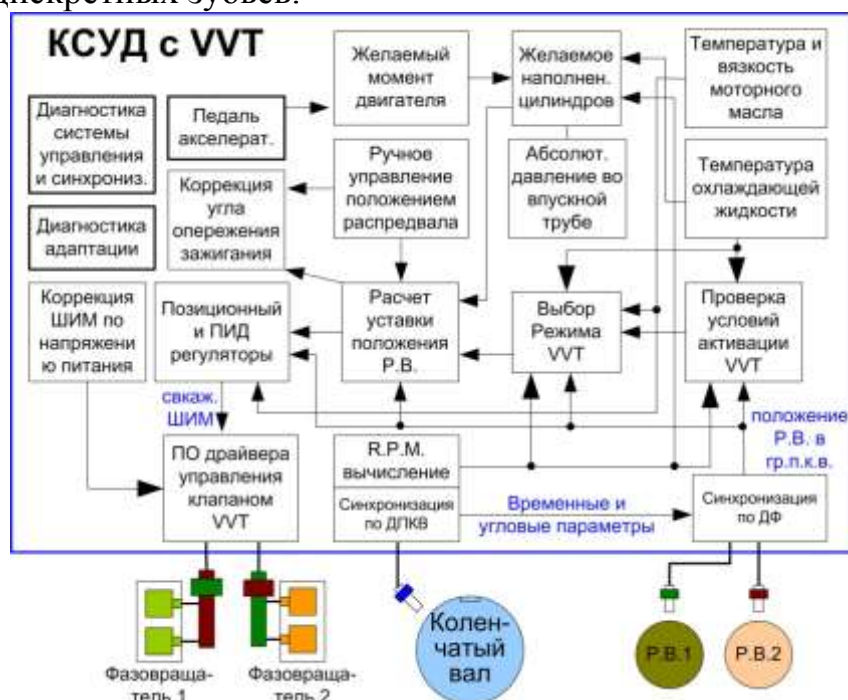


Рисунок 4 – Концепция системы управления фазами газораспределения

Контроллер управления двигателем посредством изменения скважности управляющего сигнала, подаваемого на клапан ОСV, заставляет перемещаться фазер. Система синхронизации позволяет отслеживать положение распредвала, которое используется при расчете отклонения текущего положения распределительного вала (РВ) от уставки. Приведены формулы расчета отклонения распределительного вала от условного нулевого положения по фронтам РВ:

$$\Delta X = \frac{\Delta T}{T_{\text{зуб}}} \cdot \alpha_{\text{зуб}}$$

где  $\Delta X$  – угол между двумя соседними активными фронтами коленчатого вала и распределительного вала;  $\Delta T$  – интервал времени между двумя соседними активными фронтами коленчатого вала и распределительного вала;  $T_{\text{зуб}}$  – последний измеренный период следования зубьев по коленчатому валу;  $\alpha_{\text{зуб}}$  – угол поворота коленчатого вала, который соответствует одному периоду следования двух соседних зубьев по коленчатому валу без учета выбитых.

Текущее измеренное положение распределительного вала относительно условного нуля, выбранного за систему отсчета, определяется по формуле:

$$X_{n \text{ изм.}} = N_{\text{зуб.изм.}} \cdot \alpha_{\text{зуб}} + \Delta X$$

где  $X_{n \text{ изм.}}$  – угол поворота распределительного вала относительно условного нулевого положения до выбранного фронта распределительного вала;  $N_{\text{зуб.изм.}}$  – количество зубьев коленчатого вала между условным нулем и выбранным фронтом распределительного вала с учетом пропущенных.

Отклонение от условного нулевого положения - входной параметр для системы управления фазами газораспределения, и определяется по формуле:

$$\Delta X_{n \text{ изм.}} = X_n - X_{n \text{ изм.}}$$

где  $\Delta X_{n \text{ изм.}}$  – отклонение от условного нулевого положения в градусах поворота коленчатого вала;  $X_n$  – табличный параметр, который определяет положение фронтов в системе отсчета, связанной с коленчатым валом.

Для определения адаптационных весовых коэффициентов выполняется расчет ошибки для каждого из фронтов распределительного вала:

$$\Delta \theta_n = X_n - \frac{\sum_{i=0}^n X_{n \text{ изм.}}}{n}$$

где  $\Delta \theta_n$  – ошибка отклонения распределительного вала от условного нулевого положения по фронтам;  $\sum_{i=0}^n X_{n \text{ изм.}}$  – результат нескольких измерений величины отклонения для каждого из фронтов распределительного вала.

Определение условного нулевого положения выполняется по формуле:

$$X_{n \text{ apt}} = X_n - \Delta \theta_n.$$

Величина допустимой ошибки определяется по формуле:

$$\Delta \theta_{n \text{ max}} = \theta_{\text{crk}} + \theta_{\text{cam}} + \theta_{\text{shk}} + \theta_{\text{pos}}$$

где  $\theta_{\text{crk}}$  – допуск на изготовление зубчатого колеса синхронизации коленчатого вала;  $\theta_{\text{cam}}$  – допуск на изготовление колеса синхронизации распредвала;  $\theta_{\text{shk}}$  – допуск на крутильные колебания коленчатого вала по отношению к распределительному валу;  $\theta_{\text{pos}}$  – допуск на погрешность сборки и установки зубчатого колеса.

Адаптированное положение активных фронтов зубчатого колеса распределительного вала находится по формуле

$$X_{n \text{ ret apted}} = X_n - (\Delta \theta_n \mp \Delta \theta_{n \text{ max}})$$

где  $X_{n \text{ ret apted}}$  – адаптированное крайнее позднее положение. Для позднего положения ошибка установки ремня ГРМ допустима в небольшом пределе как в раннюю так и в позднюю сторону.

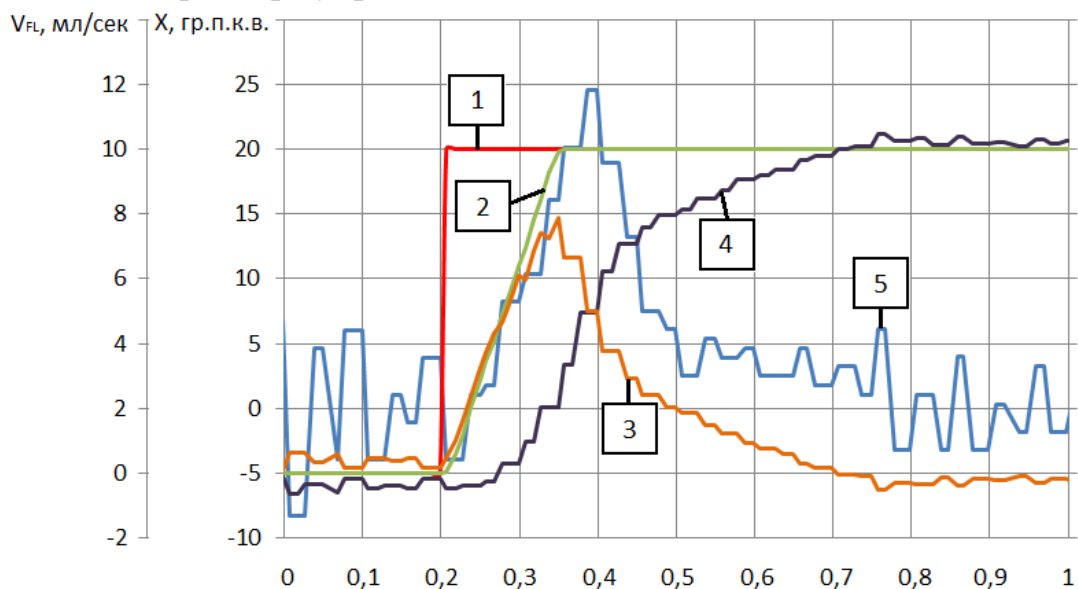
Адаптированные положения пределов регулирования для раннего упора могут быть найдены из соотношения:

$$X_{n \text{ adv apted}} = X_n - X_{n \text{ reg range}} - (\Delta \theta_n \mp \Delta \theta_{n \text{ max}} + \Delta \theta_{n \text{ reg max}})$$

где  $\Delta \theta_{n \text{ reg max}}$  – максимальная ошибка регулирования;  $X_{n \text{ reg range}}$  – предел регулирования фаз, определяющий максимальный угол поворота распредвала, при котором обеспечивается отсутствие встречи клапана с поршнем во всем диапазоне управления фазами.

Для оценки качества математической модели были проведены физические эксперименты, позволившие оценить погрешность работы разработанной системы (рис. 5).

В рамках работы разработано электронное устройство, позволяющее имитировать сигналы ДПКВ и ДФ и смещение сигнала датчика фаз. Выполнена настройка и проверка математической модели в составе программного обеспечения контроллера управления двигателем.



1-установка положения распределительного вала относительно коленчатого вала; 2-фильтрованная установка положения РВ; 3-разница между текущим положением и фильтрованной установкой; 4-текущее положение распредвала по отношению к коленчатому валу; 5-расход масла через масляный клапан  
Рисунок 5 – Изменение положения распределительного вала с помощью системы управления фазами газораспределения

**В четвертой главе** представлены модели обеспечения движения автомобиля. Модель системы «Старт–стоп» использует ряд штатных компонентов автомобиля, входящих в состав различных систем управления, таких как: электронная система управления двигателем, система комфорта, шасси и других (рис. 6). Основные системы связаны между собой интерфейсными шинами для передачи данных. По ним передаются необходимые параметры с заданной частотой обновления и требуемой точностью.

В рамках работы спроектирована модель формирования условия разрешения работы системы. Все условия разделены по приоритетам. Это необходимо для разделения условия по функциональным признакам.

Для обеспечения безопасного для стартера пуска двигателя в режиме «Старт–стоп» применяется специальная модель управления. Запрет прокрутки стартером связан с требованиями ISO к безопасности и качеству работы системы.

При формировании признака «Старт» управление передается функции, которая отвечает за запуск двигателя, разрешение включения топливного

насоса, выполняет расчет момента и подачу искры зажигания, включение реле стартера, после чего двигатель запускается.

Как показали экспериментальные исследования время пуска для контроллера со стандартной прошивкой составило 0,92 с. При моделировании системы с функцией «Старт–стоп» результат составил 0,35 с (рис. 7).

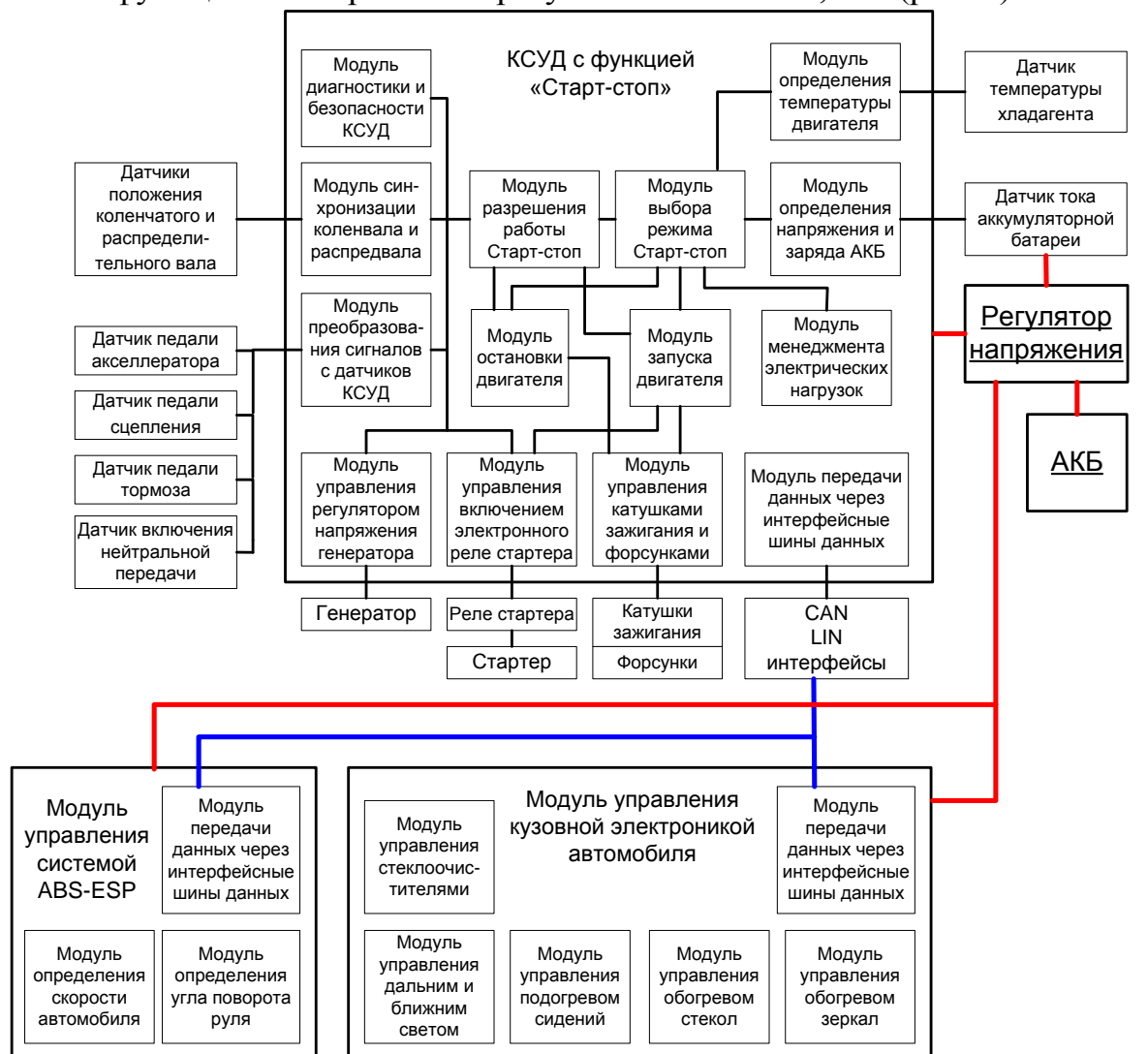
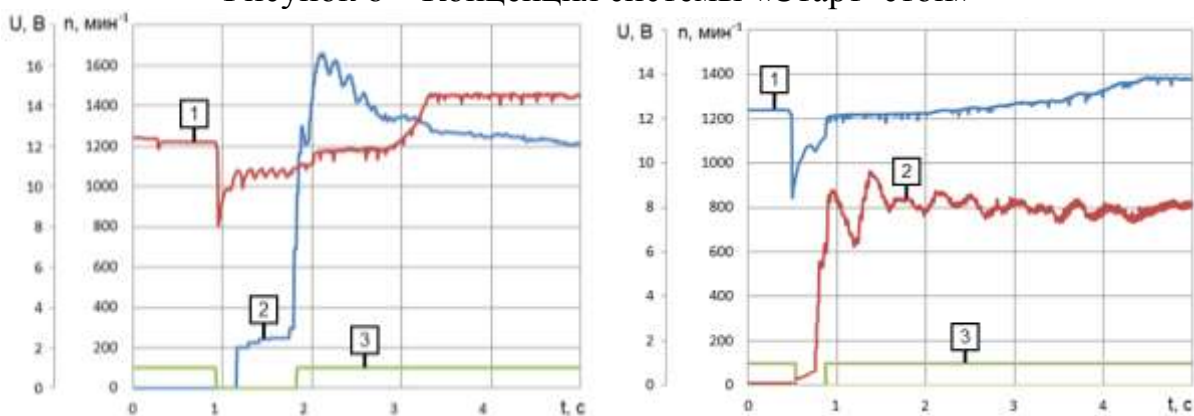


Рисунок 6 – Концепция системы «Старт–стоп»



а – со стандартным ПО

б - с функцией «Старт–стоп»

1 – напряжение бортовой сети автомобиля, 2 – частота вращения двигателя, 3 – бит прокрутки двигателя стартером

Рисунок 7 – Диаграмма пуска двигателя со стандартным ПО

Также в рамках единой концепции обеспечения движения разработана структура и математическая модель системы регулирования скорости. В состав системы регулирования включены подсистемы, которые отвечают за управление и безопасность. Модель состоит из фильтра скорости; компоненты определения режима регулирования и управления уставкой и типом функции регулирования; компоненты регулирования положения дроссельной заслонки; компоненты приостановки процесса регулирования скорости при изменении номера передачи трансмиссии; компоненты расчета длительности отклонения от заданной скорости; компоненты деактивации.

Условие постоянного движения описывается формулой:

$$C\_VSdiffneg \text{ (замедление)} < VSdiffraw < C\_VSdiffpos \text{ (ускорение)}$$

Для трех режимов движения представлена формула  $VSdiff$ :

– режим постоянного движения:

$$VSdiff = VSdiffraw \times C\_VSdiff\_fac;$$

– режим ускорения

$$VSdiff = VSdiffraw \times C\_VSdiff\_fac + C\_VSdiff;$$

– режим замедления

$$VSdiff = VSdiffraw \times C\_VSdiff\_fac - C\_VSdiff.$$

В составе базового компонента ПИ–регулирования имеется функция инициализации интегратора, которая обеспечивает плавную передачу управления от педали к системе регулирования. При активации режима поддержания или ограничения скорости интегратор ПИ–регулятора инициализируется начальным значением, которое определяется коэффициентом  $K_{int\ ini}(freq, gear)$  зависимости от частоты вращения двигателя и текущего номера передачи.

Интегральная часть общая для трех режимов регулирования.

Общая формула ПИ регулятора положения виртуальной педали акселератора имеет вид:

$$Q_{pid}(VSdiff) = P_{pid}(VSdiff) + I_{pid}(VSdiff)$$

$$K_{pid\ min} < Q_{pid}(VSdiff) < K_{pid\ max}$$

P–часть ПИ–регулятора в нормальном режиме рассчитывается по формуле:

$$P_{pid}(VSdiff) = VSdiff \cdot K_{p\ fac}(freq)$$

$$K_{p\ min} < P_{pid}(VSdiff) < K_{p\ max}$$

P–часть ПИ–регулятора при работе модели в режиме ускорения рассчитывается по формуле:

$$P_{pid\ acc}(VSdiff) = VSdiff \cdot (K_{p\ fac}(freq) + K_{p\ fac}(freq, VSacc))$$

$$K_{p\ min} < P_{pid}(VSdiff) < K_{p\ max}$$

P–часть ПИ–регулятора при работе модели в режиме замедления рассчитывается по формуле:

$$P_{pid\ dec}(VSdiff) = VSdiff \cdot (K_{p\ fac}(freq) + K_{p\ fac}(freq, VSdec))$$

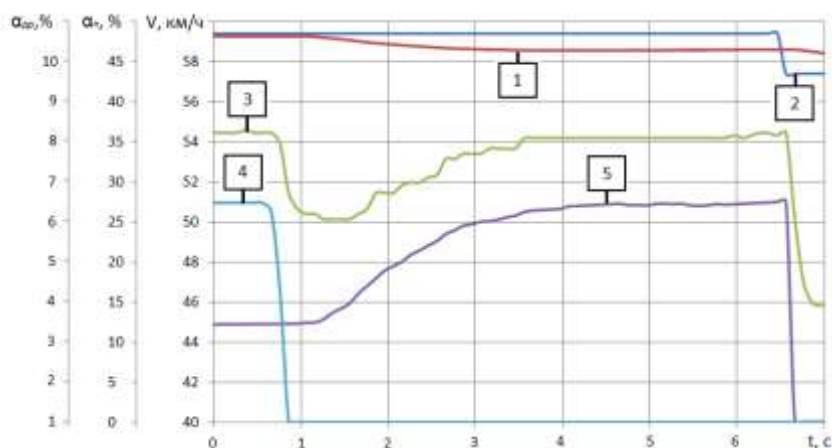
$$K_{p\ min} < P_{pid}(VSdiff) < K_{p\ max}$$

I–часть ПИ–регулятора рассчитывается по формуле:

$$I_{pid}(VSdiff) = VSdiff \cdot K_{i\ fac}(gear) \cdot K_{i\ fac}(freq)$$

$$K_{i\ min} < I_{pid}(VSdiff) < K_{i\ max}$$

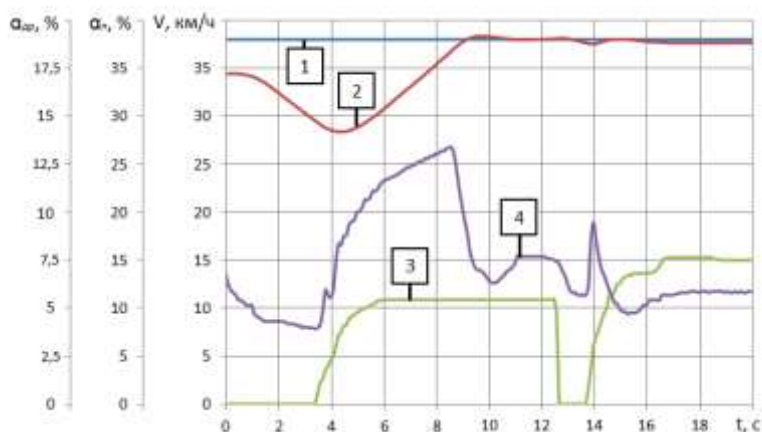
Для оценки адекватности математической модели выполнен имитационный эксперимент работы системы. Результаты работы показывают, что полученная плавность изменения значения фильтрованной скорости позволяет устранить хлопки дроссельной заслонки и уменьшить вероятность отказа и быстрого износа деталей исполнительных элементов. Запоздывание фильтрованной скорости от действительного значения составляет 150 мс (рисунок 8).



1 – уставка скорости; 2 – фильтрованная скорость; 3 – процент открытия дроссельной заслонки; 4 – процент нажатия педали акселератора; 5 – результирующее воздействие (эквивалент педали акселератора)

Рисунок 8 – Процесс передачи управления от водителя к системе

Проведено имитационное моделирование режима ограничения скорости. Особенность модели заключается в наборе скорости до значения уставки под управлением водителя и ограничении ее, несмотря на нажатие педали акселератора требующее увеличения момента (рисунок 9).



1 – уставка ограничения скорости; 2 – фильтрованная скорость; 3 – Нажатие на педаль; 4 – процент открытия дроссельной заслонки

Рисунок 9 – Режим ограничения скорости

**В заключении** отражены выводы и основные результаты исследования.

**Приложения** включают в себя фрагменты программного кода, полученного на основе разработанных математических имитационных моделей для электротехнических систем управления двигателем легкового автомобиля.



## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Анализ развития электротехнических систем управления двигателем внутреннего сгорания показал, что основные разработки сложных комплексов ведутся без привязки к конкретной модификации автомобилей, что приводит к проявлению эффекта децентрализации функций управления. В диссертационной работе выполнены комплексные научно-технические исследования по созданию общей концепции, обеспечивающей единый подход в реализации и разработке электротехнических систем управления ДВС, на основе которой разработаны математические имитационные модели систем:

1. определения вязкости масла ДВС, которая описывает взаимосвязь между геометрическими параметрами чувствительного элемента, силами действующими на его электрические контакты и вязкостью масла, находящегося между контактами;
2. регулирования фаз газораспределения. Модель обеспечивает повышение скорости достижения требуемого момента ДВС автомобиля на 12 % и расширяет диапазон частот вращения двигателя с получением максимального крутящего момента;
3. «Старт-стоп» с функцией быстрой запуск ДВС с минимальными энергетическими потерями. Применение математической модели системы «Старт-стоп» в практике автомобилестроения обеспечивают снижение времени прокрутки ДВС с 0,9 с до 0,3, с одновременным сокращением времени определения момента искрообразования и топливоподачи;
4. регулирования скорости автомобиля. Позволяет управлять углом открытия дроссельной заслонки через контроллер системы управления ДВС без применения дополнительных блоков управления, с обеспечением непосредственного воздействия на исполнительные механизмы.

Практическим результатом разработок математических имитационных моделей систем управления ДВС является универсальный электротехнический комплекс, реализованный в перспективных проектах автомобилей производства ОАО «АВТОВАЗ», а также ряд инструментов проектирования, позволяющих разрабатывать компоненты других электронных систем автомобиля, используя единый подход в реализации алгоритмов управления.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Перечень работ, опубликованных в изданиях входящих в перечень ВАК

1. Дебелов В.В. Электронная система регулирования скорости движения автомобиля в режимах поддержания и ограничения скорости [Текст] / Дебелов В.В., Козловский В.Н., Иванов В.В., Строганов В.Е., Ютт В.Е. // Грузовик. - 2013. - №12. – С. 19 – 23.

2. Дебелов В.В. Электронная система управления автомобиля «Start-Stop» [Текст] / Дебелов В.В., Козловский В.Н., Ютт В.Е. // Электроника и электрооборудование транспорта. - 2014. - №2. – С. 6 – 9.
3. Дебелов В.В. Комплекс электронных систем управления движением легкового автомобиля с комбинированной силовой установкой. Часть 1. [Текст] / Дебелов В.В., Козловский В.Н., Строганов В.И., Пьянов М.А. // Электротехнические и информационные комплексы и системы. - 2014. - №1. – С. 40–48.
4. Дебелов В.В. Комплекс электронных систем управления движением легкового автомобиля с комбинированной силовой установкой. Часть 2. [Текст] / Дебелов В.В., Козловский В.Н., Пьянов М.А., Строганов В.И. // Электротехнические и информационные комплексы и системы. - 2014. - №2. – С. 19 – 28.
5. Дебелов В.В. Моделирование электронной системы VVT управления двигателем легкового автомобиля [Текст] / Дебелов В.В., Козловский В.Н., Пьянов М.А., Строганов В.И. // Электроника и электрооборудование транспорта. - 2014. - №4 - С. 5 - 12.
6. Дебелов В.В. Моделирование электронной системы регулирования скорости движения легкового автомобиля в режимах поддержания и ограничения скорости [Текст] / Дебелов В.В., Козловский В.Н., Иванов В.В., Строганов В.И. // Электроника и электрооборудование транспорта. - 2013. - №6. – С. 2 – 7.
7. Дебелов В.В. Имитационное моделирование электронной системы определения вязкости масла в силовом агрегате автомобиля [Текст] / Слукин А.М., Дебелов В.В., Козловский В.Н., Иванов В.В. // Электроника и электрооборудование транспорта. - 2014. - №5. – С. 2 – 5.
8. Дебелов В.В. Электротехнический и программный комплекс управления двигателем внутреннего сгорания легкового автомобиля [Текст] / Дебелов В.В., Козловский В.Н., Пьянов М.А. // Электротехнические и информационные комплексы и системы. - 2015. - №1. – С. 73 – 84.
9. Дебелов В.В. Реализация электронной системы определения вязкости масла в силовом агрегате автомобиля [Текст] / Дебелов В.В., Козловский В.Н., Пьянов М.А., Слукин А.М. // Электроника и электрооборудование транспорта. - 2015. - №2. – С. 2 – 5.
10. Дебелов В.В. Моделирование и разработка электротехнического комплекса управления автомобилем в режиме старт и стоп [Текст] / Дебелов В.В., Козловский В.Н., Строганов В.И., Пьянов М.А. // Грузовик. - 2015. - №5. – С. 15 – 20.
11. Дебелов В.В. Концепция создания электротехнической и электронной системы управления «Start-Stop» легкового автомобиля [Текст] / Дебелов В.В., Козловский В.Н., Строганов В.И., Пьянов М.А. // Электроника и электрооборудование транспорта. - 2015. - №1. – С. 2 – 6.

12. Дебелов В.В. Разработка и экспериментальное исследование системы определения вязкости масла в силовом агрегате автомобиля [Текст] / Дебелов В.В., Козловский В.Н., Пьянов М.А., Слукин А.М. // Грузовик . - 2015. - №6. – С. 21 – 26.

13. Дебелов В.В. Итоги и перспективы развития электротехнических и электронных систем управления двигателем автомобиля [Текст] / Дебелов В.В., Козловский В.Н., Пьянов М.А., Иванов В.В. // Грузовик. - 2015. - №8. – С. 3 – 5.

#### Перечень работ, опубликованных в других изданиях

14. Дебелов В.В. Математическая модель движения пластины вискозиметра [Текст] / Дебелов В.В., Слукин А.М. // XI Международная научно-практическая конференция: сб. тр. науч.-практич. конф.- Пенза: ПГУСА, 2011. – С. 60 – 61.

15. Дебелов В.В. Разработка универсального эмулятора для отладки и диагностики электронной системы управления двигателем с VVT. Имитация сигнала датчика положения коленчатого вала и сигнала датчика фазы. [Текст] / Дебелов В.В., Иванов В.В., Апарин В.А. // Международная научно-практическая конференция: сб. тр. науч.-практич. конф. - Липецк: ВОИР, 2012. – С. 115 – 118.

16. Дебелов, В.В. Современные методы отладки электронных устройств, построенных на базе микроконтроллеров с архитектурой ARM. [Текст] / Дебелов В.В., Иванов В.В., Апарин В.А. // I международная научно-техническая конференция. Алгоритмические и программные средства в информационных технологиях, радиоэлектронике и телекоммуникациях: сб. тр. науч.-практич. конф.— Тольятти: ПВГУС, 2012. – С. 33 – 38.

17. Дебелов, В.В. Перспективы развития автомобильной промышленности, расширение функциональных возможностей штатных мультимедийных систем [Текст] / Дебелов В.В., Иванов В.В., Булов В.Г. // Международная научно-практическая конференция: сб. тр. науч.-практич. конф.— Липецк: ВОИР, 2012. – С. 111 – 113.

18. Дебелов, В.В. Разработка электронных вискозиметров, мониторинг параметров жидких сред. [Текст] / Дебелов В.В., Слукин А.М. // Самарская областная студенческая научная конференция посвященная 160-летию Самарской губернии: материалы докладов конкурса программы УМНИК. — Самара: РЦИТТ, 2011. — С. 142 – 143.

#### **Личный вклад соискателя.**

Основные положения диссертационного исследования разработаны автором лично. В работах, написанных в соавторстве, автору принадлежат: постановка задач [1-4], разработка методов расчёта вязкости [7, 9, 12, 14] и математических имитационных моделей [1, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12], и анализ полученных результатов [3, 4, 7, 8], обобщение результатов [5, 6, 13].

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета Д 212.140.01  
«Московский государственный машиностроительный университет  
(МАМИ) / Университет машиностроения»

Заказ № 241. Тираж 100 экз.  
Формат 60×84 1/16  
Бум. офсет. Усл. печ. л. 1,0 Уч.-изд. л. 1,0  
Отпечатано в ООО «Арт-Принт»  
445020, Самарская обл., г.Тольятти,  
ул. Гидростроевская, 14