

На правах рукописи



**Радько Александр Евгеньевич**

**УЛУЧШЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ  
НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО УЧЕТА ДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ  
В СИСТЕМЕ «АВТОМОБИЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ - НАГРУЗКА»**

Специальность 05.04.02 – Тепловые двигатели

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тула – 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

**Научный руководитель:** **Хмелев Роман Николаевич**  
доктор технических наук, доцент

**Официальные оппоненты:** **Патрахальцев Николай Николаевич**  
доктор технических наук, профессор;  
профессор каф. «Теплотехники и тепловых двигателей» ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов».

**Барченко Филипп Борисович**  
кандидат технических наук, доцент;  
доцент кафедры «Поршневые двигатели»  
ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО "Брянский государственный технический университет"

Защита состоится **30 июня 2016 года в 14-00 часов** на заседании диссертационного совета Д212.271.12 при ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу: **300012, г. Тула, проспект Ленина, 92, ауд. 9-101.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте (<http://tsu.tula.ru/>) ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

Автореферат разослан \_\_\_ мая 2016 г.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации направлять в диссертационный совет по адресу: 300012, г. Тула, проспект Ленина, 92, ТулГУ, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.271.12.

Факс: 8-4872-35-81-81.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д212.271.12



Авдеев Константин Алексеевич

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Основу современных энергетических установок автотранспортных средств составляют двигатели внутреннего сгорания (ДВС), резервы улучшения которых до конца не исчерпаны. Одним из существенных резервов улучшения мощностно-экономических и экологических показателей автомобильных ДВС, а также алгоритмов управления двигателями, является выявление сложных закономерностей функционирования динамической системы «Автомобильный ДВС – Нагрузка». Установление данных закономерностей позволит существенно сократить затраты при создании и доводке автомобильных ДВС за счет их комплексной оптимизации с учетом сложных динамических явлений и нелинейности взаимодействия процессов различной физической природы в элементах системы «Автомобильный ДВС – Нагрузка». В то же время, в последние годы растет интерес к созданию интеллектуальных транспортных систем и, в частности, интеллектуальных автомобильных ДВС, адаптирующихся к меняющимся условиям эксплуатации по режиму нагружения и частоте вращения. При этом создание интеллектуальных (адаптивных) ДВС является одним из важнейших путей развития автомобильных двигателей внутреннего сгорания.

На сегодняшний день для создания опытных образцов автомобильных ДВС и одним из основных способов оценки их потребительских качеств, в том числе тягово-скоростных показателей и топливной экономичности, является экспериментальное исследование в сочетании с аддитивным принципом практики проектирования и доводки ДВС. Такой подход обладает целым рядом известных недостатков, одним из которых является автономная отработка конструкции автомобильного двигателя и объекта, на который двигатель впоследствии будет установлен, что требует достаточно большого объема доводочных работ. Кроме того, существенные сложности при создании и доводке автомобильных ДВС возникают в связи с тем, что для данных двигателей преобладающим режимом работы является неустановившийся, характеризующийся постоянным изменением частоты вращения коленчатого вала и нагрузки. В настоящее время для решения отмеченных проблем наиболее перспективным подходом является математическое моделирование.

Таким образом, актуальность работы определяется необходимостью совершенствования отечественных автомобильных двигателей, а также сокращения материальных и временных затрат при их проектировании и доводке на основе методов математического моделирования системы «Автомобильный ДВС – Нагрузка».

**Степень разработанности темы исследования.** Разработке и исследованию динамических явлений системы «Автомобильный ДВС-Нагрузка» посвящены труды ряда ученых: Regner G., Loibner E., Krammer J., Walter L., Truemmer R., Авдеева К.А., Агуреева И.Е., В.Н. Болтинского, Белоусова Б.Н., Валеева И.Д., Гусакова С.В., Елагина М.Ю., Иващенко Н.А., Карабцева В.С., Леонова О.Б., Лашко В.А., Малиованова М.В., Маркова В.А., Патрахальцева

Н.Н., Рудого Б.П., Толшина В.И., Хайрулина А.Х., Черноусова А.А., Шibaкова В. Г., Эпштейна А.С., Юлдашева А.К. и некоторых других.

В настоящее время существуют коммерческие программные комплексы (CAE), позволяющие выполнить исследования и расчеты процесса функционирования автомобиля как единой динамической системы. К числу наиболее известных и распространенных программ относятся BOOST и CRUISE.

Известные результаты исследований динамических явлений в системе «Автомобильный ДВС - Нагрузка» для улучшения показателей работы ДВС включают, в основном, описание локальных аспектов процесса функционирования данной системы и требуют привлечения большого объема экспериментальных данных. Кроме того, отсутствует единый подход к математическому описанию динамических явлений в системе «Автомобильный ДВС - Нагрузка», что в конечном итоге требует постановки и решения научной задачи.

**Целью диссертационной работы** является улучшение экономических и тягово-скоростных показателей автомобильных двигателей за счет комплексного анализа динамических явлений в системе «Автомобильный ДВС - Нагрузка» методами вычислительного эксперимента.

**В соответствии с поставленной целью в работе решаются следующие задачи:**

- разработка на основе теории графов связей математической модели системы «Автомобильный двигатель – Нагрузка»;

- исследование функционирования математической модели системы «Автомобильный ДВС – Нагрузка»;

- установление закономерностей влияния параметров автомобильного двигателя, а также параметров шасси, дорожных условий на тягово-скоростные показатели и топливную экономичность ДВС.

- разработка методики проектировочных расчетов системы «Автомобильный ДВС – Нагрузка».

**Объектом исследования** являются двигатели ВАЗ 2106, ВАЗ 21114 и ЗМЗ–4062, а также транспортные средства, использующие данные двигатели в качестве преобразователей энергии.

**Предметом исследования** служат динамические процессы, протекающие в системе «Автомобильный ДВС – Нагрузка».

**Научную новизну составляют:**

- усовершенствованная математическая модель системы «Автомобильный ДВС – Нагрузка» для двигателей с искровым зажиганием, включающая математическое описание системы управления ДВС и модель оператора;

- закономерности влияния параметров автомобильного двигателя, агрегатов трансмиссии, ходовой части и дорожных условий на тягово-скоростные показатели и топливную экономичность ДВС.

- методика проектировочных расчетов системы «Автомобильный ДВС – Нагрузка».

**Практическую значимость составляют:**

– разработанное программное обеспечение расчета и исследования динамических явлений в системе «Автомобильный ДВС – Нагрузка» для улучшения показателей ДВС;

– результаты проектировочных расчетов системы «Автомобильный ДВС – Нагрузка», позволяющие сократить затраты при создании новых и совершенствовании существующих конструкций ДВС.

**Методология и методы исследования.** В основе исследований лежат расчетно-экспериментальные методы, базирующиеся на теории рабочих процессов ДВС, теории графов связей, тепломеханике, статистическом анализе и вычислительной математике, а также известных и апробированных на практике экспериментальных методах исследования ДВС.

**Личный вклад состоит:**

– в разработке усовершенствованного математического описания системы «Автомобильный ДВС - Нагрузка», включающего модель системы управления двигателем и оператора, а также уточненную математическую модель трансмиссии;

– в установлении закономерностей влияния параметров автомобильного двигателя, а также параметров шасси, дорожных условий на топливную экономичность и тягово-скоростные показатели ДВС;

– в разработанной методике проектировочных расчетов системы «Автомобильный ДВС – Нагрузка»;

– в рекомендациях по выбору фаз газораспределения двигателя ЗМЗ-4062 для улучшения тягово-скоростных показателей и топливной экономичности ДВС.

**Положения, выносимые на защиту:**

– усовершенствованная математическая модель системы «Автомобильный ДВС – Нагрузка»;

– методика проектировочных расчетов системы «Автомобильный ДВС – Нагрузка»;

– закономерности влияния параметров автомобильного двигателя, шасси, дорожных условий, на тягово-скоростные показатели и топливную экономичность ДВС;

– рекомендации по выбору параметров автомобильного двигателя и агрегатов трансмиссии для улучшения тягово-скоростных показателей и топливной экономичности ДВС.

**Реализация работы.** Результаты диссертации внедрены в практику конструкторского отдела двигателей АО «АК «Туламашзавод», а также в учебный процесс кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

**Апробация работы.** Основные результаты работы доложены и обсуждены на международных научно-технических и научно-практических конференциях «Перспективы развития науки и образования» (Россия, Тамбов, январь 2014г.), «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе»

(Россия, Пермь, апрель 2014г., апрель 2015г., апрель 2016г.), «Транспортно-технологическому комплексу – энергоэффективную альтернативу» (Россия, Воронеж, март 2016г.), а так же «IX региональной магистерской научной конференции» (Россия, Тула, апрель 2014г.).

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 11 печатных работ, в том числе 3 статьи в изданиях ВАК и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Объем работы.** Диссертационная работа изложена на 126 страницах основного машинописного текста, содержит 68 рисунков и 9 таблиц. Она состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы, состоящего из 98 отечественных и иностранных источников, и 14 приложений.

## 2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** Произведен анализ работ по исследованию динамических явлений, протекающих как в автомобильном двигателе, так и в системе «Автомобильный ДВС – Нагрузка». Сформулирована цель и определены задачи настоящей диссертации. Произведен анализ актуальности данной темы и сформулирована научная новизна работы.

**Первая глава** посвящена разработке и исследованию математических моделей двигателей легковых автомобилей. Разработан граф связей автомобильного двигателя с искровым зажиганием, приведены система уравнений разработанной модели и принятые допущения. Разработана структурная схема и математическая модель системы управления инжекторным ДВС. Произведена проверка адекватности разработанной математической модели реальным объектам.

Разработка математической модели ДВС основана на теории графов связей, являющейся одним из наиболее эффективных методов построения математического описания сложных динамических систем.

Процесс построения графов связей основывается на описании обмена энергией соответствующих элементов исследуемой системы (механической, электрической, гидравлической и др.) с окружающей средой и между собой. Указание причинности элементов графов связей является их характерной особенностью, позволяющей сделать описание элементов согласованным для объединения в единую систему. Графы связей позволяют:

- установить непротиворечивость схемы исследуемой системы;
- обоснованно выбрать рабочие характеристики элементов системы;
- получить представление о физической сущности изучаемого процесса;
- алгоритмизировать процесс получения математического описания исследуемой системы.

На рис. 1 представлен обобщенный граф связей автомобильного ДВС с искровым зажиганием.

При построении графа использовались общепринятые в теории графов связей обозначения, в частности:  $S_e$  – источник усилия;  $R$  – рассеивающий элемент, отражающий потери энергии;  $I$ ,  $C$  – накапливающие индуктивный и емкостной элементы, соответственно;  $TF$  – трансформирующий элемент;  $MS$ ,  $MR$

– моделирующие элементы (элементы с изменяющимися характеристиками); 1- узел общего потока.

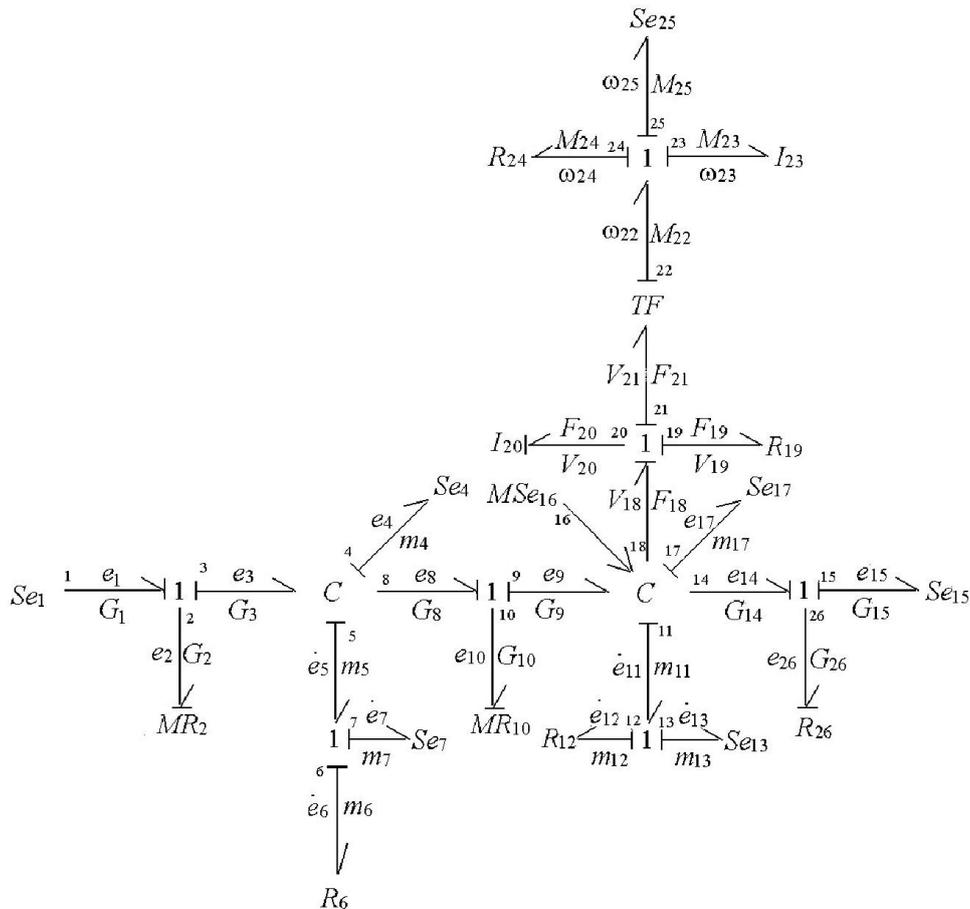


Рис. 1. Граф связей ДВС с искровым зажиганием

В зависимости от поставленных задач исследований граф связей может упрощаться или усложняться за счет более детального рассмотрения каждого интересующего звена, или объединения нескольких звеньев в единое целое.

Обобщенная математическая модель ДВС, в рассматриваемом случае, базируется на системе 12 обыкновенных дифференциальных уравнений. Уравнения, описывающие изменение состояния рабочего тела в каждом цилиндре имеют вид:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{W} \left[ G_{n1} + G_{n2} - G_{p1} - G_{p2} - \rho \cdot f_n \cdot \omega \cdot a_2 \right]$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{c_v \cdot \rho \cdot W} \left[ G_{n1} (i_{n1} - u) + G_{n2} (i_{n2} - u) - (G_{p1} + G_{p2}) (i - u) + \dot{Q}_\Gamma - \dot{Q}_{\text{ТЦ}} - p \cdot f_n \cdot \omega \cdot a_2 \right]$$

$$p = \rho RT,$$

где  $W$  - текущий объем рабочего тела;  $G_{n1}$  и  $G_{p1}$  - секундный массовый приход и расход газа через впускной клапан;  $G_{n2}$  и  $G_{p2}$  - секундный массовый приход и расход газа через выпускной клапан;  $f_n$  - площадь поршня;  $\omega$  - угловая ско-

рость коленчатого вала;  $c_v$  – удельная изохорная теплоемкость;  $u, i$  – удельная внутренняя энергия и энтальпия газовой среды;

$\dot{Q}_Г$  – секундный приход энергии в форме теплоты при горении рабочей смеси;

$\dot{Q}_{ТЦ}$  – секундный приход (расход) энергии в форме теплоты в результате теплообмена в цилиндре.

Для описания изменения состояния газа во впускном коллекторе, который моделировался как полость постоянного объема  $W_K$ , использовались уравнения:

$$\frac{d\rho_K}{dt} = \frac{1}{W_K} \left[ \sum_{j=1}^4 (G_{p1} - G_{n1})_j + G_{nk} - G_{pk} \right],$$

$$\frac{dT_K}{dt} = \frac{1}{c_{vK} \cdot \rho_K \cdot W_K} \left[ - \sum_{j=1}^4 G_{n1j} (i_{n1} - u_K) + \sum_{j=1}^4 G_{p1j} (i_j - u_K) + G_{nk} (i_{en} - u_K) - G_{pk} (i_{n1} - u_K) - \dot{Q}_{ТЦ} \right]$$

где  $j$  – номер цилиндра;  $G_{nk}$  и  $G_{pk}$  – секундный массовый приход и расход газа через дроссельную заслонку при текущих значениях площади проходного сечения и коэффициента гидравлического сопротивления;  $\dot{Q}_{ТЦ}$  – секундный приход (расход) энергии в форме теплоты в результате теплообмена во впускном коллекторе.

Угловая скорость и угол поворота коленчатого вала двигателя определяются из уравнений:

$$\frac{d\omega_3}{dt} = \frac{1}{J} M_3, \quad \frac{d\varphi}{dt} = \omega,$$

где  $J$  – момент инерции маховика,  $M_3 = M_1 - M_2 - M_4$ ,  $M_1$  – движущий момент,  $M_2$  – момент механических потерь:  $M_2 = f(c_m, p_{cp})$ ;  $c_m$  – средняя скорость поршня;  $p_{cp}$  – среднее давление в цилиндре;  $M_4$  – момент сопротивления двигателя (нагрузка), который определяется с помощью графа связей автомобиля.

Уравнение для определения движущего момента имеет вид:

$$M_1 = \sum_{j=1}^4 a_{4j} \left[ (p_j - p_0) f_n - F_{трj} - a_{3j} m_n \omega^2 - a_{2j} m_n \frac{d\omega_3}{dt} \right],$$

где  $p_0$  – давление рабочего тела под поршнем;  $F_{тр}$  – сила трения в цилиндро-поршневой группе;  $m_n$  – приведенная масса частей двигателя, совершающих возвратно-поступательное движение.

Рассмотренная динамическая модель ДВС является нульмерной. К настоящему времени накоплен определенный положительный опыт применения нульмерных динамических моделей ДВС к решению важных для практики проектирования автомобильных ДВС задач. Нульмерные динамические модели позволяют:

- определять показатели переходных процессов ДВС;
- устанавливать связь условий эксплуатации, структуры и параметров кон-

струкции с фактом устойчивой работы ДВС;

– осуществлять оптимальное управление двигателем на переходных режимах;

Рассматриваемая модель является экономичной с точки зрения затрат машинного времени, что является важнейшим условием при длительных многоцикловых расчетах функционирования ДВС в составе транспортного средства.

Динамическая модель ДВС является универсальной и может использоваться для описания процесса функционирования двигателей различных типов.

Для двигателей с искровым зажиганием разработано математическое описание системы управления ДВС. Отличительной особенностью систем автоматического управления (САУ) инжекторных двигателей является обеспечение точного и стабильного баланса топливовоздушной смеси, а именно  $\alpha = 1$ , для эффективной работы системы нейтрализации. При этом цикловой расход воздуха является основным командным параметром системы автоматического регулирования топливоподачи двигателя. Таким образом, математическая модель САУ инжекторного ДВС включает:

1) Математическое описание циклового наполнения  $G_m$  цилиндров топливом в виде зависимости

$$G_m = \frac{G}{\alpha \cdot l_0},$$

где  $l_0$  – стехиометрический состав горючей смеси.

2) Математическое описание изменения угла опережения зажигания в виде регрессионной зависимости

$$\varphi_{o.z.} = f(\omega, G_m).$$

Проверка адекватности разработанной модели производилась для двигателей ВАЗ 21114, ЗМЗ 4062 на основе сравнения экспериментальных данных по ВСХ двигателей, и данных, полученных с помощью математического моделирования, в диапазоне рабочих режимов ВСХ.

Для проверки адекватности модели двигателя ЗМЗ 4062 и для получения зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от площади открытия дроссельной заслонки использовался измерительный комплекс, приведенный на рис. 2, разработанный на кафедре «Автомобили и автомобильное хозяйство» Тульского государственного университета.

Для обработки аналогового сигнала, поступающего от измерительного оборудования, применен USB осциллограф Disko производства фирмы Trade – М. Для отображения и записи изменения параметров ДВС при работе экспериментальной установки использовался программный комплекс DiSco Motor-Scan, интерфейс которого приведен на рис. 3.

Измерительный комплекс включает: двигатель ЗМЗ-4062; экспериментальное оборудование фирмы "Kistler", состоящего из комплекта измерительной аппаратуры для установки на ДВС с датчиками и усилителями.



Рис. 2. Экспериментальная установка двигателя ЗМЗ 4062 с комплектом измерительного экспериментального оборудования фирмы "Kistler"



Рис. 3. Общий вид интерфейса программного комплекса DiSco Motor-Scan

Сравнение экспериментальных и расчетных значений удельного эффективного расхода топлива (г/кВт·ч) двигателя ВАЗ 2106 представлены на рис. 4, а эффективной мощности (кВт) и эффективного крутящего момента (Н·м) двигателя ЗМЗ 4062 представлены на рис. 5.

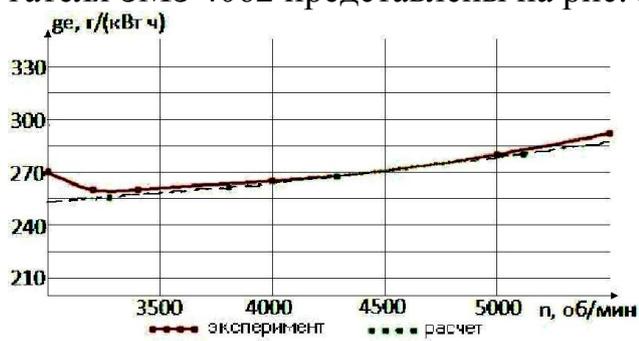


Рис. 4. Сравнение результатов экспериментов для двигателя ВАЗ 2106

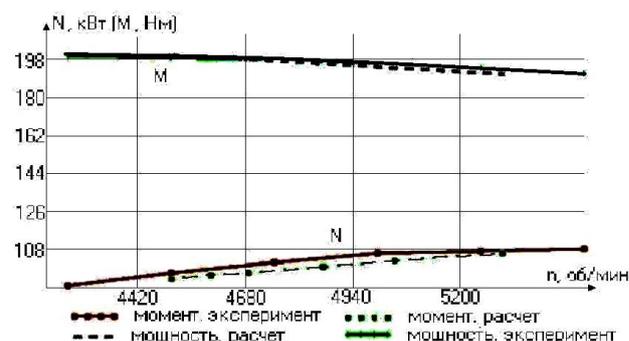


Рис. 5. Сравнение результатов экспериментов для двигателя ЗМЗ 4062

Расхождение экспериментальных и расчетных данных не превышает 5 %.

Во второй главе разработан обобщенный граф связей и математическая модель системы «Автомобильный ДВС – Нагрузка», а так же модель оператора данной системы. Произведен комплексный анализ функционирования системы «Автомобильный ДВС – Нагрузка» при различных условиях эксплуатации на примере двигателя ЗМЗ-4062 на автомобиле ГАЗ-3110.

Под нагрузкой в данном случае понимается момент сопротивления, передающийся на коленчатый вал двигателя. Определение текущего значения момента сопротивления является сложной задачей, решение которой зависит от совокупности динамических процессов, происходящих как в двигателе, так и в автомобиле в целом, а также от дорожных и метеорологических условий. Для автомобильных двигателей момент сопротивления, как правило, определяется на основе опытных данных по эмпирическим зависимостям.

При создании динамической модели системы «Автомобильный ДВС – Нагрузка» использовался метод графов связей. Принципиальная возможность использования данного метода при разработке динамической модели системы

«Автомобильный ДВС – Нагрузка» была проиллюстрирована в работах Авдеева К.А., Малиюванова М.В. и Хмелева Р.Н.. Однако описание ряда узлов требовало уточнения и сформированная с использованием описаний данного графа модель имела ограниченное применение.

В настоящей работе предложен обобщенный граф связей (рис. 6) системы «Автомобильный ДВС – Нагрузка» с уточненным описанием агрегатов трансмиссии.

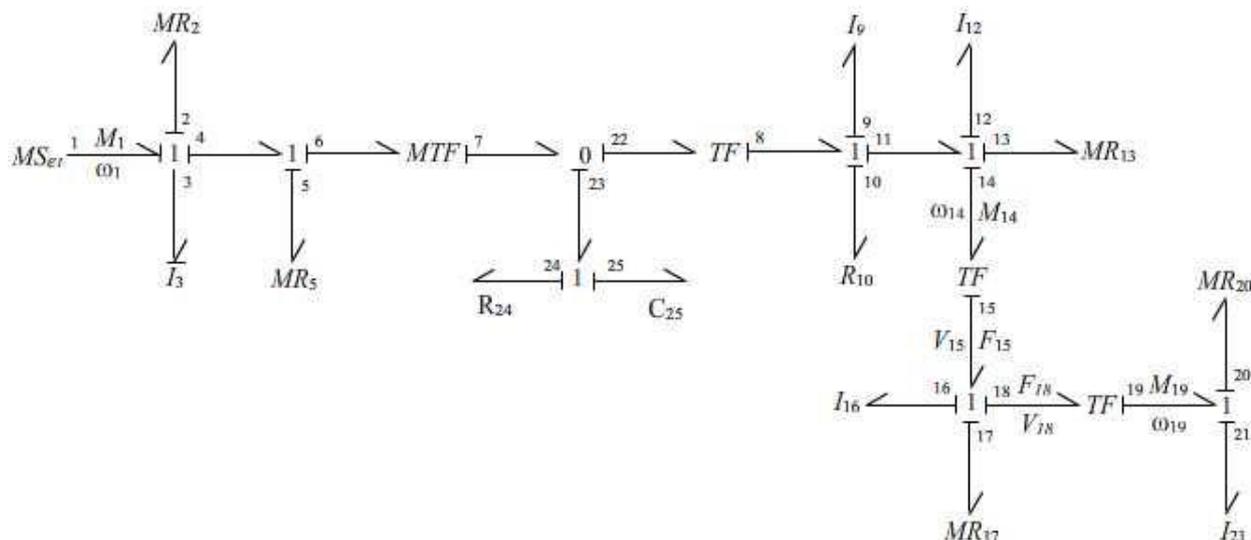


Рис. 6. Обобщенный граф связей автомобиля

Характеристика энергетических базовых звеньев, входящих в граф приведена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика энергетических базовых звеньев

Энергетические базовые звенья	Наименование агрегата (узла) автомобиля
$S_{e1}, MR_2, I_3$	двигатель
$MR_5, MTF_7$	диск сцепления
$R_{24}, C_{25}$	гаситель крутильных колебаний
$TF_8, I_9, R_{10}$	коробка переключения передач, карданная и главная передача
$I_{12}, MR_{13}, TF_{15} (I_{21}, MR_{20}, TF_{19})$	ведущие (ведомые) колеса
$I_{16}, MR_{17}$	корпус автомобиля

В математической модели системы «Автомобильный ДВС - Нагрузка» диск сцепления с фрикционными накладками моделируется двумя энергетическими базовыми звеньями:

– модулированным трансформатором угловой скорости  $MTF$ , задающим закон изменения передаточного отношения сцепления  $i_c$ ;

– модулированным сопротивлением  $MR_5$ , определяющим величину момента  $M_5$ , передаваемого сцеплением при буксовании:

$$i_c = \begin{cases} \frac{I}{t_{\bar{\sigma}}} [i_{c0} t_{\bar{\sigma}} + (1 - i_{c0})(t - t_i)]; & \text{при } t_i \leq t \leq t_i + t_{\bar{\sigma}} \\ I & \text{при } t > t_i + t_{\bar{\sigma}} \end{cases}$$

$$M_5 = \begin{cases} \frac{4L_{\bar{\sigma}}}{\omega_5 t_{\bar{\sigma}}^2} (t - t_i) & \text{при } t_i \leq t < t_i + 0,5t_{\bar{\sigma}} \\ \frac{4L_{\bar{\sigma}}}{\omega_5 t_{\bar{\sigma}}^2} (t_i + t_{\bar{\sigma}} - t) & \text{при } t_i + 0,5t_{\bar{\sigma}} \leq t \leq t_i + t_{\bar{\sigma}} \\ 0; & \text{при } t > t_i + t_{\bar{\sigma}} \text{ или } t < t_i \end{cases}$$

где  $t_{\bar{\sigma}}$  – время буксования;  $t_i$  – момент времени, соответствующий началу включения сцепления;  $i_{c0}$  – передаточное отношение сцепления в момент времени  $t_i$ ;  $L_{\bar{\sigma}}$  – работа буксования;  $M_6 = M_4 - M_5$ ;  $\omega_6 = \omega_5 = \omega_4$ ;  $M_7 = \frac{M_6}{i_c}$ ;  $\omega_7 = i_c \omega_6$ .

Коробка переключения передач и главная передача моделируются общим трансформирующим элементом:

$$M_8 = i_{knn} i_{zn} M_7; \quad \omega_8 = \frac{\omega_7}{i_{knn} i_{zn}},$$

где  $i_{knn}$  и  $i_{zn}$  – передаточные отношения коробки передач и главной передачи соответственно.

Инерционные и диссипативные свойства трансмиссии отражаются звеньями  $I_9$  и  $R_{10}$  соответственно. При этом

$$M_9 = J_9 \frac{d\omega_9}{dt},$$

где  $J_9$  – момент инерции элементов трансмиссии.

Момент сопротивления  $M_{10}$  принимался постоянным с учетом КПД трансмиссии. Для единичного узла  $M_{11} = M_8 - M_9 - M_{10}$ ;  $\omega_{11} = \omega_{10} = \omega_9 = \omega_8$ .

Ведущее колесо моделируется тремя звеньями:

- инерционным элементом ( $I_{12}$ );
- трансформирующим элементом, задающим закон трансформации угловой скорости в линейную ( $TF$ );
- рассеивающим элементом ( $MR_{13}$ ):

$$M_{12} = J_{12} \frac{d\omega_{12}}{dt}; \quad M_{13} = R_z f_0 r_k; \quad M_{14} = M_{11} - M_{12} - M_{13};$$

$$\omega_{14} = \omega_{13} = \omega_{12} = \omega_{11}; \quad V_{15} = \omega_{14} r_k; \quad F_{15} = \frac{M_{14}}{r_k},$$

где  $J_{12}$  – момент инерции колеса;  $r_k$  – радиус колеса;  $R_z$  – нормальная реакция опорной поверхности;  $f_0$  – коэффициент сопротивления качению колеса.

Ведомое колесо представлено звеньями  $I_{21}$ ,  $MR_{20}$ ,  $TF$  и моделируется аналогичным образом.

Корпус автомобиля представлен двумя звеньями:

– инерционным элементом ( $I_{16}$ );

– рассеивающим элементом, учитывающим сопротивление воздуха при движении автомобиля ( $MR_{17}$ ):

$$F_{16} = M_{a16} \frac{dV_{16}}{dt}; \quad F_{17} = k_{\omega} A_l V_{17}^2; \quad F_{18} = F_{15} - F_{16} - F_{17};$$

$$V_{18} = V_{15} = V_{16} = V_{17},$$

где  $M_{a16}$  – масса автомобиля;  $V_{16}$  – скорость движения автомобиля;  $k_{\omega}$  – коэффициент сопротивления воздуха;  $A_l$  – лобовая площадь автомобиля.

В результате выполненных преобразований момент сопротивления, передающийся на коленчатый вал двигателя определяется по формуле:

$$M_4 = M_5 + M_{10} + \frac{i_c}{i_{кпп} i_{zn}} \left( r_k^2 M_{a16} \frac{d\omega_{12}}{dt} + 4 J_{16} \frac{d\omega_{12}}{dt} + J_9 \frac{d\omega_{12}}{dt} + R_z f_0 r_k + \right. \\ \left. + r_k^3 k_{\omega} A_l \omega_{17}^2 \right).$$

Модель оператора представляет собой управление передаточными числами коробки переключения передач (КПП) и площадью открытия дроссельной заслонки. Их изменение происходит при достижении определенных, заранее заданных, скоростей.

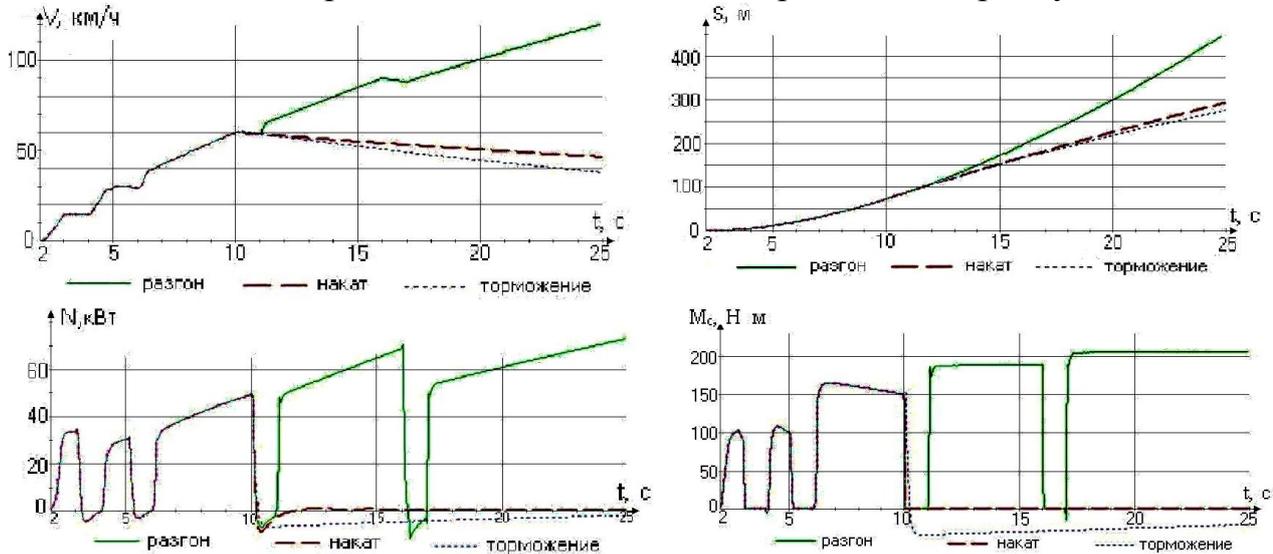
С помощью рассмотренной выше математической модели произведен комплексный анализ работы системы «Автомобильный ДВС – Нагрузка» на примере двигателя ЗМЗ 4062 и автомобиля ГАЗ 3110 в различных режимах движения, таких как:

- разгон автомобиля до скорости 120 км/ч;
- разгон с последующим движением накатом до полной остановки;
- разгон с последующим торможением двигателем;
- движение при различных значениях радиуса качения колеса;
- движение при различных значениях коэффициента сопротивления качению;
- имитация движения согласно первой части городского ездового цикла NEDC.

На рис. 7 представлены изменения скорости  $V$  (км/ч), перемещения  $S$  (м), мощности двигателя  $N$  (кВт) и момента сопротивления  $M_c$  (Н\*м) от времени при разгоне автомобиля, движении накатом и торможении двигателем.

Анализируя поведение системы при различных коэффициентах сопротивления качению колес можно сделать вывод, что наилучшая тягово-скоростная динамика наблюдается при наименьшем коэффициенте сопротивления, а лучшая топливная экономичность за час работы двигателя наблюдается

при наибольшем коэффициенте сопротивления качению. При движении с различными радиусами качения колес при неизменных модели оператора и моментах инерции колес наилучшие тягово-скоростные свойства наблюдаются при движении с наибольшим радиусом качения колес, и лучшая топливная экономичность за час работы двигателя – так же при большем радиусе.



**Рис. 7. Результаты вычислительного эксперимента при разгоне автомобиля, движении накатом и торможении двигателем**

Рис. 7 отражает поведение системы «Автомобильный ДВС - Нвгрузка» при разгоне, движении накатом и торможении двигателем.

Разработанное математическое и программное обеспечение расчета процесса функционирования системы «Автомобильный ДВС – Нагрузка» позволяет исследовать ее и установить закономерности влияния параметров шасси, дорожных условий и режима эксплуатации на тягово-скоростные показатели и топливную экономичность ДВС.

**В третьей главе** разработана методика проекторочных расчетов системы «Автомобильный ДВС – Нагрузка». Приведены примеры проекторочных расчетов данной системы на примере двигателя ЗМЗ 4062 и автомобиля ГАЗ 3110.

В основу предлагаемой методики проекторочных расчетов положен метод ЛП – поиска, позволяющий равномерно охватить область поиска. ЛП $\tau$  – последовательности обладают наилучшими характеристиками равномерности среди всех существующих последовательностей.

При использовании этого метода пространство параметров зондируется пробными точками равномерно распределенной последовательности (ЛП $\tau$ ), с учетом функциональных ограничений, в каждой из которых вычисляются все критерии оптимальности. Далее путем наложения критериальных ограничений определяется несколько оптимальных решений.

Предлагаемая методика проекторочных расчетов системы «Автомобильный ДВС – Нагрузка» включает следующие этапы:

– формирование расчетных точек пространства основных конструктивных параметров системы «Автомобильный ДВС – Нагрузка» с помощью метода ЛП-поиска;

– анализ системы «Автомобильный ДВС – Нагрузка» с помощью разработанной математической модели (проведение вычислительного эксперимента).

– выбор совокупности основных конструктивных параметров, обеспечивающих выполнение требований технического задания.

На основе предложенной методики проектировочных расчетов произведен анализ влияния:

– конструктивных параметров двигателя на функционирование системы «Автомобильный ДВС - Нагрузка»;

– конструктивных параметров агрегатов трансмиссии на функционирование системы «Автомобильный ДВС - Нагрузка».

В качестве варьируемых конструктивных параметров двигателя были выбраны фазы газораспределения ДВС. Изменение угла открытия клапанов принималось на основании анализа значений фаз газораспределения для двигателей аналогичного класса.

В качестве критериев эффективности функционирования ДВС принимались:

– время разгона автомобиля до 15 км/ч, 30 км/ч, 60 км/ч, 90 км/ч и 120 км/ч соответственно;

– расход топлива ДВС на холостом ходу;

– расход топлива при разгоне автомобиля с места до скорости 120 км/ч;

– расход топлива при движении в установившемся режиме.

Результаты вычислительного эксперимента по анализу влияния фаз газораспределения на время разгона представлены в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость времени разгона от фаз газораспределения

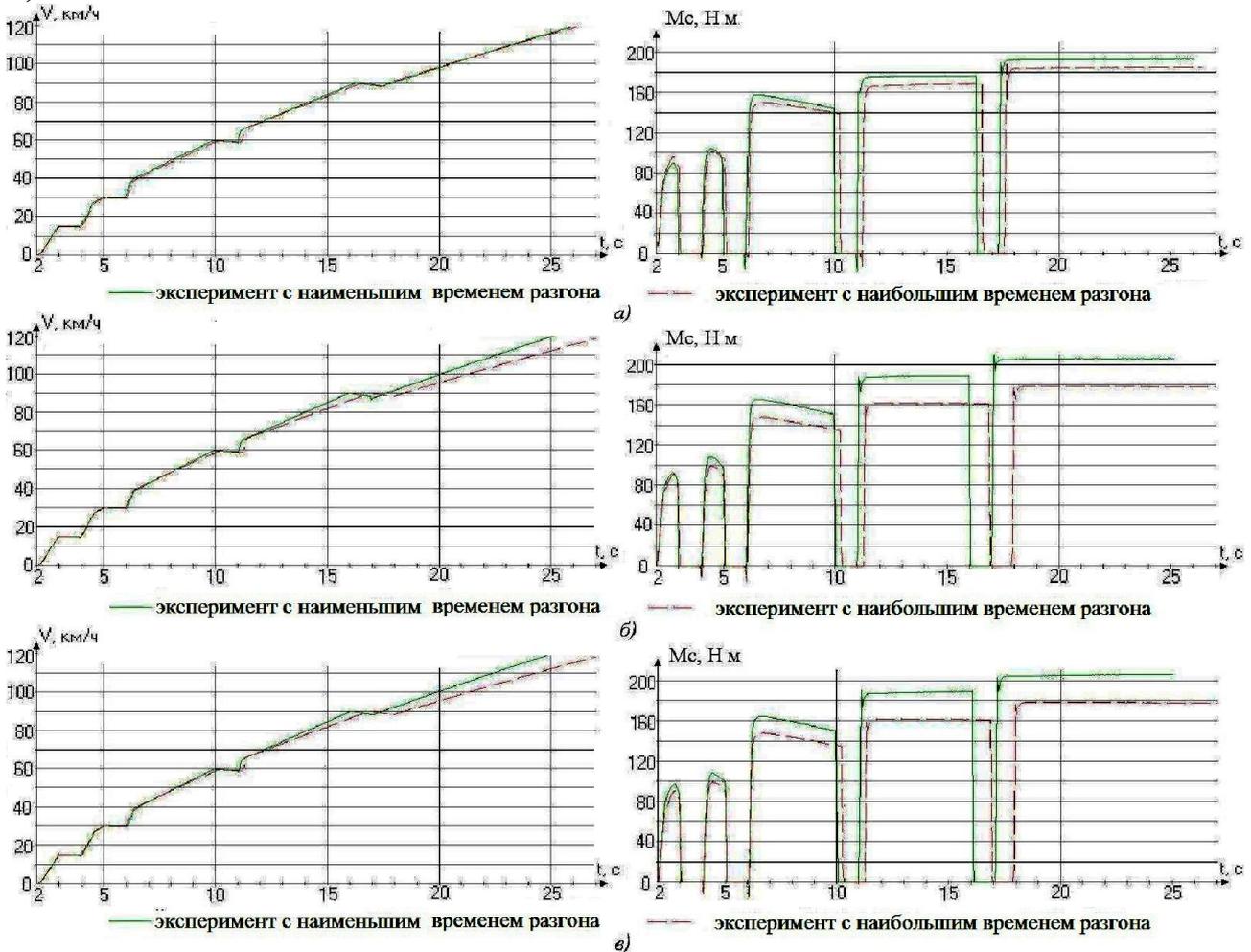
№	Фазы открытия/закрытия клапанов, ПКВ		Время разгона (с) до скорости				
	выпускных	впускных	15 км/ч	30 км/ч	60 км/ч	90 км/ч	120 км/ч
1	<b>118/370</b>	<b>355/607</b>	<b>0,88</b>	<b>2,88</b>	<b>7,86</b>	14,24	23,98
2	122/374	339/591	0,97	2,99	7,97	13,99	23,17
3	128/380	342/594	1,01	3,04	8	14,08	23,03
<b>4</b>	<b>128/380</b>	<b>340/592</b>	1,06	3,12	8,02	<b>13,99</b>	<b>22,93</b>

Проведенный анализ результатов вычислительного эксперимента показал, что разница по времени разгона с рассматриваемыми вариантами фаз газораспределения может составлять до 20 %.

На рис. 8 представлены зависимости изменений скорости и моментов сопротивлений от времени для экспериментов с наименьшим и наибольшим временем разгона до 15, 30, 60, 90 и 120 км/ч соответственно.

Анализ влияния фаз газораспределения на расход топлива показал, что:

- разница в расходе топлива на холостом ходу при изменении фаз согласно проведенным расчетам составляет до 6,4 %;
- разница в расходе топлива для режима разгона автомобиля при изменении фаз согласно проведенным расчетам составляет до 5,8 %;
- разница в расходе топлива при движении автомобиля в установившемся режиме при изменении фаз согласно проведенным расчетам составляет до 2,3 %.



**Рис. 8. Результаты вычислительных экспериментов для наименьшего и наибольшего времени: а) разгона до 15, 30, и 60 км/ч; б) разгона до 90 км/ч; в) разгона до 120 км/ч**

Из рис. 8 видно, что для экспериментов с наибольшим и наименьшим временем разгона наблюдается значительная разница момента сопротивления и время разгона до скорости 120 км/ч.

На основании анализа результатов расчетов, приведенных в табл. 2 и на рис. 8 можно обоснованно выбирать фазы газораспределения для заданных режимов эксплуатации автомобиля в зависимости от экономических и тягово-скоростных требований.

В табл. 3 представлены значения фаз газораспределения, позволяющих получить минимальный расход топлива на холостом ходу и в режимах разгона и установившегося движения, а так же минимальное время разгона на 1-5 передачах.

Рекомендации по выбору фаз газораспределения

		Минимальный расход топлива			Минимальное время разгона	
		холостой ход	разгон	установившийся режим	1-3 передачи	4-5 передачи
Фазы открытия/закрытия клапанов, ПКВ	выпуск	128/380	137/389	137/389	118/370	128/380
	выпуск	342/594	352/604	352/604	355/607	340/592

Для анализа влияния параметров агрегатов трансмиссии на функционирование системы «Автомобильный ДВС – Нагрузка» использовались параметры и характеристики двигателя ЗМЗ 4062 и автомобиля ГАЗ 3110.

В качестве варьируемых параметров агрегатов трансмиссии были выбраны передаточные числа коробок переключения передач (КПП) и главной передачи (ГП). Вычислительный эксперимент проводился с тремя исследуемыми КПП и соответствующими им ГП:

- пятиступенчатой коробкой передач 3110-1700010 и ГП 3110-2402010;
- четырехступенчатой коробкой передач 3110-1700010-10 и ГП 3110-2402010;
- пятиступенчатой коробкой передач 3302-1700010 и ГП 3302-2402010.

В качестве критерия эффективности совместной работы ДВС и трансмиссии для автомобиля ГАЗ-3110 принимались:

- расход топлива при разгоне автомобиля с места до скорости 120 км/ч;
- расход топлива при движении автомобиля в установившемся режиме;
- время разгона автомобиля до 15 км/ч, 30 км/ч, 60 км/ч, 90 км/ч и 120 км/ч соответственно.

Анализ влияния параметров трансмиссии на расход топлива показал, что:

- разница в расходе топлива при разгоне автомобиля с рассматриваемыми вариантами агрегатов трансмиссии составляет до 20 %;
- разница в расходе топлива (л/100 км) при движении автомобиля в установившемся режиме с рассматриваемыми вариантами агрегатов трансмиссии составляет до 21,3 %.

Результаты вычислительного эксперимента по анализу влияния конструкций КПП и ГП на динамические показатели автомобиля представлены в табл. 4.

Анализ влияния передаточных чисел КПП и ГП на функционирование системы «Автомобильный ДВС - Нагрузка» показал, что разница по времени разгона автомобиля с рассматриваемыми вариантами КПП и ГП может составлять до 18 %.

Зависимость времени разгона автомобиля от типов КПП и ГП

Тип КПП/ГП	время разгона (с) до скорости				
	15 км/ч	30 км/ч	60 км/ч	90 км/ч	120 км/ч
3110-1700010/ 3110-2402010	1,06	3,12	8,02	13,99	22,93
3110-1700010-10/ 3110-2402010	1,07	3,19	8,28	14,02	20,04
3302-1700010/ 3302-2402010	1,17	3,51	8,45	14,48	23,65

Для каждой трансмиссии на рис. 9 приведены графики изменения во времени давления в первом цилиндре двигателя (Па), перемещения автомобиля (м), мощности двигателя (кВт) и момента сопротивления (Н·м).

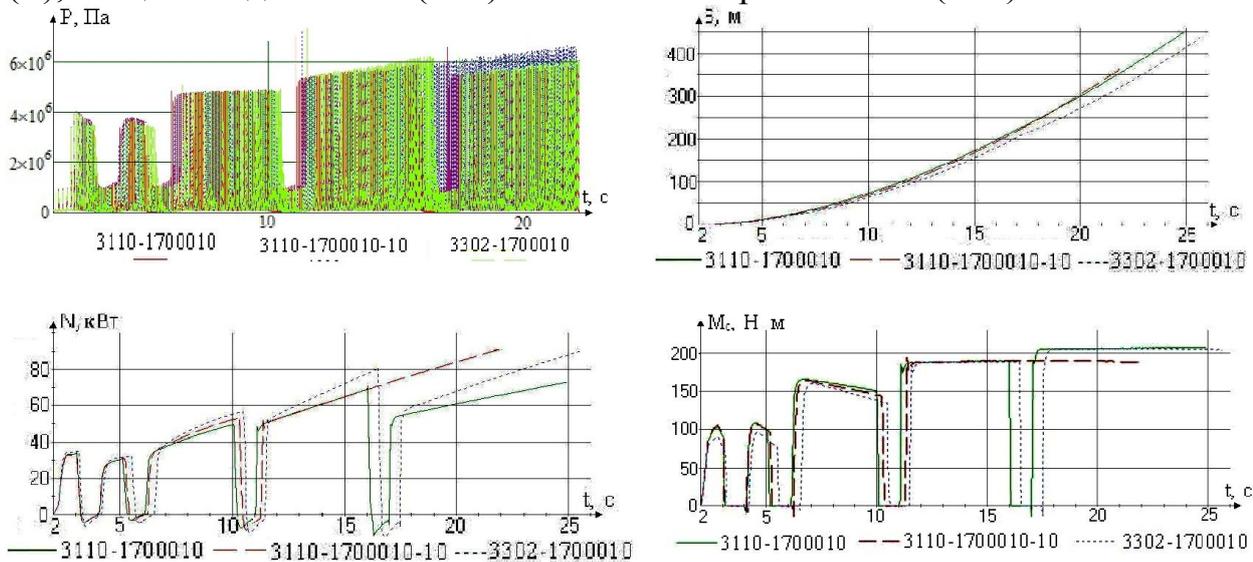


Рис. 9. Результаты вычислительного эксперимента при различных КПП и ГП

На основании анализа результатов расчетов, приведенных в табл. 4 и на рис. 9 можно обоснованно выбирать КПП и ГП для заданных режимов эксплуатации автомобиля в зависимости от экономических и тягово-скоростных требований.

В табл. 5 представлены КПП и ГП, позволяющие получить минимальный расход топлива в режимах разгона и установившегося движения, а так же минимальное время разгона.

Таблица 5

Рекомендации по выбору КПП и ГП

	Минимальный расход топлива		Минимальное время разгона	
	разгон	установившийся режим	до скорости 90 км/ч	до скорости 120 км/ч
<b>КПП/ГП</b>	3110-1700010-10/ 3110-2402010	3110-1700010/ 3110-2402010	3110-1700010/ 3110-2402010	3110-1700010-10/ 3110-2402010

Таким образом, выбор фаз газораспределения и передаточных чисел КПП и ГП на стадии проектировочных расчетов системы «Автомобильный

ДВС – Нагрузка» может быть обоснован результатами вычислительных экспериментов на разработанной математической модели.

**В заключении** приведены основные результаты работы и выводы диссертации.

### **Основные результаты и выводы:**

1. Разработана усовершенствованная математическая модель системы «Автомобильный ДВС – Нагрузка». Подтверждена адекватность математических моделей двигателей с искровым зажиганием реальным объектам по критерию Фишера.

2. Разработано программное обеспечение расчета системы «Автомобильный ДВС – Нагрузка», позволяющее проводить совместное исследование работы двигателя и автомобиля как единой динамической системы на переходных режимах, что подтверждается свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617047.

3. Проведены исследования и анализ динамических явлений в системе «Автомобильный ДВС – Нагрузка» в различных условиях функционирования автомобильных двигателей. Установлены закономерности влияния изменения нагрузки на двигатель в различных режимах движения автомобиля.

4. Установлены закономерности влияния параметров ДВС, трансмиссии, ходовой части, дорожных условий на тягово-скоростные и экономические характеристики автомобильных двигателей с искровым зажиганием, а именно: фаз газораспределения, передаточных чисел КПП и ГП, радиуса качения колес и коэффициентов сопротивления качению.

5. Разработана методика проекторочных расчетов системы «Автомобильный ДВС – Нагрузка», позволяющая определить структуру и параметры ДВС и автомобиля в целом, обеспечивающая выполнение требований к характеристикам двигателя как в установившихся, так и в неустойчивых режимах функционирования.

6. На основании результатов вычислительных экспериментов были получены рациональные значения фаз газораспределения двигателя ЗМЗ-4062 на режимах холостого хода, разгона и установившегося движения по критериям топливной экономичности и наилучших тягово-скоростных показателей автомобиля. Сформулированы рекомендации по выбору фаз газораспределения двигателя ЗМЗ-4062 и агрегатов трансмиссии автомобиля ГАЗ-3110 с двигателем ЗМЗ-4062 для улучшения тягово-скоростных показателей и топливной экономичности.

7. Результаты диссертации внедрены в практику конструкторского отдела двигателей ПО «Туламашзавод», а также в учебный процесс кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

**Основные положения диссертации и полученные результаты опубликованы:**

**Публикации в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертации**

1. **Радько, А.Е.** Разработка и исследование динамических моделей двигателей легковых автомобилей [Текст] / Р.Н. Хмелев, А.Е. Радько, А.Н. Подъемщиков // Известия

Тулского государственного университета. Технические науки. – Вып. 11: в 2 ч. – 2014. – Ч.1. – С. 362-368.

2. **Радько, А.Е.** Разработка математической модели системы управления автомобильным двигателем с искровым зажиганием [Текст] / И.Е. Агуреев, М.В. Малиованов, А.Е. Радько, Р.Н. Хмелев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Вып. 5: в 2 ч. – 2015. – Ч.1. – С. 8-13.

3. **Радько, А.Е.** Экспериментальное исследование показателей работы атмосферного и наддувного двигателей ЗМЗ-406 [Текст] / И.Е. Агуреев, М.Ю. Власов, Ю.В. Мягков, К.Ю. Платонов, А.Е. Радько, Р.Н. Хмелев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Вып. 5: в 2 ч. – 2015. – Ч.1. – С. 176-181.

#### **Статьи в сборниках трудов и научных конференций**

1. **Радько, А.Е.** Имитационное моделирование ездового цикла автомобиля [Текст] / М.В. Малиованов, Р.Н. Хмелев, А.Е. Радько // Материалы МНПК «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе». – Пермь: ПНИПУ, 2014. – С. 151-153.

2. **Радько, А.Е.** Особенности применения аппарата графов связей для математического описания процесса функционирования автомобиля [Текст] / М.В. Малиованов, Р.Н. Хмелев, А.Е. Радько // Материалы МЗНПК «Перспективы развития науки и образования». – Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком», 2014. – С. 77-78.

3. **Радько, А.Е.** Разработка и исследование математической модели системы управления двигателем ЗМЗ-406 [Текст] / И.Е. Агуреев, Р.Н. Хмелев, А.Е. Радько // Материалы МНПК «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе». – Пермь: ПНИПУ, 2015. – С. 14-17.

4. **Радько, А.Е.** Имитационная модель двигателя ВАЗ 21114 [Текст] / А.Е. Радько // Материалы IX региональной магистерской научной конференции. – Тула: ТулГУ, 2014. – Ч.1. – С. 104-105.

5. **Радько, А.Е.** Анализ методов моделирования автотранспортных средств [Текст] / А.Е. Радько // Молодежный вестник Политехнического института. – Тула: ТулГУ, 2014. – С. 195-198.

6. **Радько, А.Е.** Анализ закономерностей функционирования динамической системы «Автомобильный двигатель-Нагрузка» [Текст] / А.Е. Радько, Р.Н. Хмелев, Г.В. Поздеев // Материалы МНПК «Транспортно-технологическому комплексу – энергоэффективную альтернативу». – Воронеж, 2016. – С. 122-126.

7. **Радько, А.Е.** Математическое моделирование, исследование и расчет динамических процессов в системе «автомобильный двигатель – нагрузка» / А.Е. Радько, Р.Н. Хмелев // Материалы МНПК «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе». – Пермь: ПНИПУ, 2016. – С. 101-104.

#### **Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ**

1. **Радько, А.Е.** Программный комплекс «Имитационная динамическая модель автомобиля» [Текст] / М.В. Малиованов, Р.Н. Хмелев, А.Е. Радько // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617047. Заявл. 27.05.2014. рег. 10.07.2014.