

На правах рукописи

Алиев Али Ямудинович

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА И РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ
ПОВЫШЕНИЯ ПУСКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ
ТЕМПЕРАТУР**

Специальность: 05.04.02 – Тепловые двигатели

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2007

Работа выполнена в Махачкалинском филиале ГОУ ВПО Московского автомобильно-дорожного института (государственного технического университета)

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Иващенко Николай Антонович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Фомин Валерий Михайлович

кандидат технических наук...

Ведущая организация: Южно-Российский государственный технический университет (НПИ), г. Новочеркасск.

Защита диссертации состоится _____ 2007 года в ____ часов на заседании диссертационного совета Д212.141.09 при ГОУ ВПО Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Лефортовская наб., 1).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «__» _____ 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
Кандидат технических наук, доцент

Тумашев Р.З.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Двигателестроительная промышленность в настоящий период переживает очередной технологический подъем, что связано с необходимостью перехода на новый технический уровень, удовлетворяющий резко возрастающим требованиям по экономии топлива, экологии, безопасности, комфорту и, в целом, по повышению конкурентоспособности продукции.

Система пуска двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является одной из главных на современном транспортном средстве. Затрудненный пуск двигателя в сложных климатических условиях создает не просто неудобство, но и обуславливает повышенный износ деталей ДВС, снижение эксплуатационных возможностей транспортного средства, а иногда напрямую связан с проблемой обеспечения безопасности.

Современные требования по эксплуатации автомобильных бензиновых ДВС в условиях низких температур (согласно международному стандарту – минус 27⁰С) вызывают необходимость использования энергетически емких бортовых источников для обеспечения эффективного функционирования систем пуска и других вспомогательных агрегатов и систем двигателя.

В связи с этим перспективной является концепция применения комплексных систем многоуровневого напряжения со стартер – генераторной установкой (СГУ) и микропроцессорным управлением, являющихся определяющим фактором для повышения эксплуатационных показателей современного ДВС и автомобиля.

Несмотря на то, что многие зарубежные фирмы достигли определенных результатов в создании систем многоуровневого напряжения для автомобилей, в нашей стране эти работы находятся на начальной стадии и многие вопросы в области использования СГУ в системах пуска ДВС и генерирования бортовой энергии остаются нерешенными. В частности, остаются, не исследованы комплексные системы СГУ для запуска ДВС и генерирования электрической энергии с микропроцессорным управлением.

Следует отметить, что применение СГУ с микропроцессорным управлением предопределяет возможность совершенствования, наряду с рассмотренными выше, и других характеристик транспортного ДВС. СГУ является эффективным электромагнитным гасителем (демпфером) крутильных колебаний вала ДВС и представляет перспективную альтернативу механической системе демпфирования. Микропроцессорная система СГУ в автоматическом режиме может выполнять функции системы «Stop and Go», обеспечивая при этом значительную экономию топлива в городском режиме движения. Кроме того, система с СГУ, работая совместно с ДВС, обеспечивает частичную гибридизацию энергетической установки автомобиля, способствуя тем самым повышению динамических качеств автомобиля.

Изложенное выше обуславливает целесообразность проведения анализа и обобщения известных работ, дополнительных исследований СГУ с целью совершенствования пусковых и энергетических характеристик транспортного ДВС, что и определяет *актуальность выбранного направления исследования.*

Народно – хозяйственная проблема. Диссертационная работа выполнялась в рамках Федеральной целевой программы «Развитие автомобильной промышленно-

сти России на период до 2005 года», а также подпрограммы «Исследование, разработка и выпуск опытно – промышленных партий стартер – генераторных установок с многоуровневым напряжением и электронным управлением для комплектации легковых автомобилей производства 2005...2010г.г.».

Рабочая гипотеза. В каждой конкретной ситуации существует сочетание технических средств и условий для решения вопросов создания систем пуска ДВС и бортового генерирования электроэнергии, при которых эксплуатационные издержки будут наименьшими, а технические характеристики наилучшими.

Научная гипотеза. Для повышения эффективности существующих способов пуска ДВС и генерирования бортовой энергии необходимо применение высокоэффективных многоуровневых систем с СГУ, обеспечивающей высокие пусковые и энергетические характеристики двигателя. В методологическом плане подобный подход предусматривает не определение глобального оптимума и разработку универсальных рекомендаций, а выявление наилучшего решения в каждой конкретной ситуации эксплуатации ДВС. Целесообразность разработки методологии выявления подобных сочетаний обуславливает научную гипотезу данного исследования.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является исследование метода и разработка высокоэффективных средств обеспечения надежного пуска автомобильных бензиновых ДВС в условиях низких температур окружающей среды (до - 30⁰С) и генерирования бортовой электроэнергии с многоуровневым напряжением на основе применения стартер – генераторных установок с микропроцессорным управлением.

Исходя из поставленной цели, определены следующие *задачи* исследования:

1. Сформулировать и методически обосновать концепцию обеспечения низкотемпературного (до минус 30⁰С) пуска двигателя с искровым зажиганием на основе применения комплексной стартер – генераторной системы с микропроцессорным управлением операциями пуска и генерирования бортовой энергии.

2. Разработать методику расчета параметров пускового режима системы «ДВС-СГУ» на основе совместного моделирования рабочих процессов двигателя и электрической машины, позволяющую проводить поиск рациональных решений при организации режимов пуска в указанных условиях.

3. С использованием разработанной методики провести расчетно-теоретические исследования с целью определения энергетических и динамических (разгонных) характеристик системы «ДВС-СГУ» и выявления условий эффективного проведения пуска ДВС в зависимости от температуры окружающей среды.

4. Провести комплекс экспериментальных исследований с целью проверки достоверности разработанной методики и результатов расчетного анализа и уточнения характеристик пускового момента и времени разгона применительно к двигателям автомобилей семейства ВАЗ, а также для оценки эксплуатационной эффективности работы предложенной стартер – генераторной установки в составе автомобильного ДВС.

5. Систематизировать и обобщить полученные теоретические и практические результаты исследования с учетом возможности их распространения для ДВС всех типов отечественных легковых автомобилей с механической трансмиссией. В том числе, по результатам проведенного исследования обосновать выбор стартер – ге-

нераторной установки на базе вентильного электродвигателя применительно к ДВС нового семейства автомобилей ВАЗ и разработать схему его размещения в картере сцепления без изменения его базовой конструкции.

Объектом исследования являлся автомобильный двигатель, оснащенный стартер – генераторной установкой с микропроцессорным управлением и процессы, определяющие возможность повышения его пусковых и энергетических характеристик.

Предмет исследования. Методы и средства реализации способов повышения пусковых и энергетических характеристик ДВС, а также модели формирования этих характеристик при работе двигателей в конкретных эксплуатационных ситуациях.

Методы исследования. При проведении исследований были использованы методы классической механики, методики системного подхода к формированию пусковых характеристик ДВС, совместное математическое моделирование процессов в системе «ДВС-СГУ», статистические методы обработки информации, экспериментальные методы исследования, как в лабораторных, так и в натуральных условиях. Лабораторные и моторные испытания проведены в лабораториях ОАО «Авиаагрегат» и ОАО «АвтоВАЗ».

Научная новизна работы:

- с использованием предложенной методики расчета параметров пускового процесса системы «ДВС-СГУ» исследованы рациональные режимы эффективного пуска ДВС в зависимости от температуры окружающей среды;
- исследованы условия по обеспечению работы СГУ в соответствии с международными требованиями, предъявляемыми к многоуровневым стартер-генераторным системам автомобильных ДВС при напряжениях 24 и 42В;
- разработаны математические модели и программы расчетов режимов работы СГУ на напряжении 24 и 42В;
- предложена методика экспериментальных исследований пусковых характеристик автомобильного двигателя, оснащенного опытной системой СГУ с многоуровневым напряжением и микропроцессорным управлением.

Достоверность и обоснованность научных положений и полученных результатов определяются:

- применением фундаментальных законов теории ДВС, теоретической механики, теплофизики, электромеханики и термодинамики, а также их соответствие выявленным особенностям изучаемых процессов;
- использованием корректных средств и методов натуральных измерений на стенде с полноразмерным двигателем;
- экспериментальным подтверждением с достаточной точностью результатов расчета параметров пускового процесса системы «ДВС-СГУ».

Практическая значимость работы.

1. Разработаны рекомендации по совершенствованию пусковых характеристик в условиях низких температур для ДВС семейства легковых автомобилей с рабочим объемом до 2.5 л на основе рационального выбора параметров предложенной комплексной системы с СГУ и микропроцессорным управлением.
2. Предложена усовершенствованная система низкотемпературного пуска ДВС для

семейства автомобилей ВАЗ, содержащая высокоэффективный стартер – генераторный комплекс с возможностью обеспечения многоуровневого напряжения 12 и 48 В, обеспечивающий надежный (не превышающий 10 с) запуск двигателя в условиях температуры окружающей среды до минус 30⁰С без применения специальных средств облегчения пуска.

3. Разработана микропроцессорная система управления СГУ, реализующая функции оптимизации эффективного пуска ДВС с учетом климатических условий эксплуатации, электромагнитного демпфера крутильных колебаний вала ДВС, системы «Stop and Go», а также частичной гибридизации энергетической установки автомобиля и генерирования бортовой электроэнергии многоуровневого напряжения.

Реализация результатов работы. Решенные в работе задачи являются частью перспективных научно-исследовательских и проектных работ, проводимых ОАО «Авиаагрегат» совместно с кафедрой электромеханики Южно-Российского ГТУ, по техническим требованиям ОАО «АвтоВАЗ».

Материалы диссертации и ее результаты используются в учебном процессе на кафедре «Автомобильный транспорт», ДСХА и МФ МАДИ (ТУ) при изучении дисциплины «Автомобильные двигатели».

Апробация работы. Диссертационная работа заслушана и одобрена на заседании кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Основные положения работы доложены и обсуждены на:

- Международном симпозиуме по автоэлектрике и авто-электронике «Автомобильное электрооборудование, конструкция, материалы, технология. Проблемы перевода АТЭ на напряжение питания 42В», (Суздаль, 2001г.).

- Научно - практических конференциях кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта и автосервиса», МАДИ, 2002...2005 г.г.

- Научно - практических конференциях кафедры «Автомобильный транспорт», ДСХА, 2002...2005 г.г.

-Международной научно-практической конференции «Основные проблемы, тенденции и перспективы устойчивого развития производства», г. Махачкала, 2006г.

Публикации. Основные результаты работы отражены в 6-ти печатных работах, в том числе в 4-х научных статьях, 2-х тезисах на международных научно – практических конференциях и подготовлены материалы на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 150 страницах и содержит введение, четыре главы основного содержания, проиллюстрированного 13 таблицами и 45 рисунками, общие выводы и список использованной литературы из 82 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы и выбранного направления исследования, сформулирована его цель и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации изложен анализ расчетно-теоретических и экспериментальных исследований, посвященных изучению методов и средств пуска автомобильных ДВС. Исследования, посвященные проблеме холодного пуска ДВС,

проводились в разные периоды времени в научно-исследовательских и учебных центрах России, а также за рубежом. Проанализированы работы российских и зарубежных исследователей, посвященные развитию методов электрического пуска ДВС: М.Л.Минкина, В.А.Назарова, Н.Н.Сметнева, В.В.Корницкого, И.С.Хвощева.

Исследовательские работы, отражающие развитие методов математического моделирования внутрицилиндровых процессов ДВС, осуществлены такими учеными, как Н.А.Иващенко, Р.З.Кавтарадзе, Р.М.Петриченко, С.А.Батурин, G.Woschni.

Большой вклад в развитие и разработку электрического привода для пуска ДВС, в том числе, и индукторного электропривода внесли ученые: Л.Ф.Коломейцев, С.А.Пахомин, Д.В.Крайнов, Е.А.Слепков и др.

Проведенный анализ состояния работ по проблеме улучшения пусковых качеств автомобильных ДВС с искровым зажиганием в условиях низких температур позволил сделать следующее заключение.

Неуклонно продолжающийся рост автопарка страны требует периодического обновления стандартов и повышения требований к уровню показателей технической эксплуатации транспортных средств, в том числе, к совершенствованию пусковых характеристик ДВС в условиях низких температур.

На основе проведенного анализа выявлено, что основные трудности при пуске ДВС в условиях низких температур сводятся к следующему:

1. В результате низкой температуры воздуха поступающего в цилиндры ДВС из окружающей атмосферы, повышения теплоотдачи в стенки камеры сгорания, и увеличение утечки воздуха при сжатии из-за уменьшения числа оборотов коленчатого вала понижается температура конца сжатия.
2. Вследствие повышения вязкости моторного масла и увеличения в связи с этим момента сопротивления, падения емкости аккумуляторных батарей снижается частота вращения вала двигателя.
3. Вследствие низких температур ухудшаются процессы смесеобразования (испаряемость топлива) и воспламенения.

Анализ современного состояния и перспектив развития систем пуска и генераторных систем автомобильных двигателей показывает, что:

1. В связи с появлением новых нормативных требований в настоящее время назрела острая потребность в улучшении показателей пуска автомобильных ДВС при низких температурах окружающей среды (до -27°C) и повышения уровня бортового генерирования электрической энергии, что, в частности, связано с постоянным возрастанием мощности агрегатов двигателя и автомобиля с электрическим приводом.

2. При пуске двигателя в условиях низких температур весьма важно обеспечить повышение момента пусковой системы, способствующего уменьшению времени разгона ДВС до режима, при котором обеспечивается его надежный запуск.

3. Повышение энергетических возможностей пускового устройства является в рассматриваемых условиях действенным средством улучшения пусковых качеств ДВС.

4. Современное состояние развития автомобильных ДВС обуславливает необходимость применения комбинированных стартер - генераторных систем много

уровневого напряжения, обеспечивающих, наряду с эффективным пуском двигателя при низких температурах, генерирование электроэнергии для бортовых нужд и повышения динамических характеристик транспортного средства.

5. Подобные высокоэффективные системы еще не нашли своего широкого применения на отечественных автомобилях. Отдельные образцы таких систем, созданные по образцу европейских систем, технологически не совершенны и по многим показателям не удовлетворяют эксплуатационным требованиям. Учитывая существующее техническое состояние российского автомобилестроения и отсутствие отечественного исследовательского опыта массового изготовления подобных систем, их перспективная разработка обуславливает необходимость проведения углубленных исследований, связанных с изучением комплекса вопросов теоретического и экспериментального характера.

С учетом результатов проведенного анализа были сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе проведено расчетно-теоретическое исследование энергетических и динамических показателей системы «ДВС-СГУ» в период холодного пуска двигателя с использованием методов математического моделирования. При этом целевая задача исследования сводилась к поиску целесообразного выбора параметров пускового устройства с учетом обеспечения высокой эффективности операции пуска ДВС в условиях низких температур (до -30°C) окружающей среды.

Согласно данным энергетического анализа пускового процесса работа, затрачиваемая при проворачивании вала двигателя от начала движения до момента успешного пуска двигателя, складывается из:

- 1) работы преодоления внутренних сопротивлений двигателя L_T , определяющейся величиной среднего давления трения;
- 2) работы компрессии L_K и преодоления потерь в процессах сжатие-расширение, обусловленные утечками и охлаждением рабочего тела;
- 3) работы на сообщение кинетической энергии L_j движущимся массам при разгоне двигателя от состояния покоя до угловой скорости вращения коленчатого вала ω_n , обеспечивающей надежный запуск двигателя.

Таким образом, полная работа, затрачиваемая на проворачивание вала двигателя, определится уравнением:

$$L_{np} = L_T + L_K + L_j. \quad (1)$$

Работа трения при проворачивании вала на угол $d\varphi$ определялась как:

$$L_T(\varphi) = M_T(\varphi)d\varphi.$$

Приняв допущение, что за короткий промежуток времени пуска масло в картере заметно не нагревается (т. е. не изменяется его вязкость), работа трения за период пуска может быть определена интегрированием:

$$L_T(\varphi) = \int_{\varphi=0}^{\varphi} M_T(\varphi)d\varphi, \quad (2)$$

где φ – угол поворота вала на текущем шаге расчета; $\varphi = 2\pi N$; N – количество оборотов, которые совершил вал с момента начала движения ($\varphi = 0$) до рассматриваемого момента.

Уравнение момента трения для диапазона угловых скоростей $\omega = (0 \dots 5) \text{ c}^{-1}$:

$$M_T(\varphi) = 10^{-3} \frac{V_h i}{4\pi} \left[0,2 + 1,31 \left(\frac{3\omega}{10\pi} \right)^{1/4} \nu_{10^0}^{1/3} + 0,022 \frac{30\omega}{\pi} \left(\nu^{1/3} - \nu_{10^0}^{1/3} \right) \right], \quad (3)$$

а для последующих скоростей прокручивания вала ДВС ($\omega > 5 \text{ с}^{-1}$):

$$M_T(\varphi) = 10^{-3} \frac{V_h i}{4\pi} \left[0,2 + 1,31 \left(\frac{3\omega}{10\pi} \right)^{1/4} \nu^{1/3} \right]. \quad (4)$$

Значение вязкостей ν для различных масел при соответствующей температуре оценивалось по справочным данным. Момент, необходимый для преодоления сил инерции, определялся зависимостью:

$$M_j(\varphi) = J_m \frac{d\omega}{d\tau}. \quad (5)$$

Работа на преодоление сил инерции движущихся масс при разгоне двигателя из положения покоя до рассматриваемой (текущей) угловой скорости вращения коленчатого вала ω определялась уравнением:

$$L_j(\varphi) = J_m \int_{\omega=0}^{\omega} \omega \frac{d\omega}{d\varphi}, \quad (6)$$

где J_m — приведенный к оси коленчатого вала полярный момент инерции всех движущихся масс системы «ДВС-СГУ».

Работа L_k и среднее давление p_k определялись на основе моделирования. Математическая модель пускового процесса сформирована в виде подмоделей: 1) процессов газообмена; 2) процесса «холодного» сжатия-расширения.

Имея в виду, что температурные состояния рабочего тела и стенок КС в период холодного пуска в отсутствии сгорания ($dR/d\varphi = 0$) практически одинаковые ($dQ_w/d\varphi = 0$), уравнение баланса энергии для процессов продувки и наполнения записывались в следующем виде:

$$m \frac{du}{d\varphi} + u \frac{dm}{d\varphi} = h_{\text{ex}} \frac{dm_{\text{ex}}}{d\varphi} - h_{\text{выл}} \frac{dm_{\text{выл}}}{d\varphi} + p \frac{dV}{d\varphi}, \quad (7)$$

а дифференциальное уравнение состояния рабочего тела:

$$\frac{1}{p} \frac{dp}{d\varphi} - \frac{\mu_m}{\mu_a m} \frac{dm_a}{d\varphi} - \frac{\mu_m}{\mu_f m} \frac{dm_f}{d\varphi} - \frac{1}{T} \frac{dT}{d\varphi} + \frac{1}{V} \frac{dV}{d\varphi} = 0. \quad (8)$$

где m , m_{ex} , $m_{\text{выл}}$, общая масса рабочего тела и его массы, вводимые и отводимые через впускные и выпускные органы газообмена; u — внутренняя энергия рабочего тела; h_{en} , $h_{\text{выл}}$ — удельные энтальпии потоков рабочего тела при входе в цилиндр и при выходе из него соответственно; T , p , V — температура, давление, объем рабочего тела; индексы f и a определяют принадлежность параметров для топлива и воздуха соответственно.

Температура рабочего тела (смесь топлива и воздуха) в цилиндре при условии, что в данный период подогрев топливовоздушной смеси в цилиндре и во впускном патрубке отсутствует, определялась с учетом ее изменения, обусловленным гидравлическим сопротивлением впускных клапанов и испарением топлива. Температура смеси во впускном патрубке оценивалась только с учетом испарения топлива.

Модель процесса сжатия описывает энергетические затраты СТУ, связанные с преодолением компрессии в одном из цилиндров на интервале, начало которого совпадает с моментом закрытия впускного клапана, а конец – с моментом открытия выпускного клапана. На такте сжатия – расширения в период холодного пуска ДВС относительные потери рабочего тела (утечки) через неплотности цилиндра возрастают вследствие низкой пусковой частоты вращения вала и соответствующего увеличения времени осуществления этого такта. Уравнение баланса массы для данной, частично открытой системы (органы газообмена закрыты) удовлетворяет условию:

$$m(\varphi) - m_{\text{VT}}(\varphi) = m_a(\varphi) + m_f(\varphi). \quad (9)$$

$$\frac{dm_{\text{VT}}}{d\varphi} = (\mu f)_{\text{непл}} \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k}-1}} p \rho. \quad (10)$$

С учетом известных рекомендаций эквивалентное эффективное сечение для неплотностей (поршневые кольца с диаметром D) рассчитывалось как:

$$(\mu f)_{\text{непл}} = \frac{\pi D^2}{2} 10^{-5}. \quad (11)$$

С учетом того, что газовая постоянная R при отсутствии процесса сгорания (неизменном составе рабочего тела) может быть принята постоянной ($dR/d\varphi = 0$), уравнения баланса энергии с учетом утечек рабочего тела dm_{VT} через неплотности цилиндра и уравнение состояния примут следующий вид:

$$\frac{d(m u)}{d\varphi} = p \frac{dV}{d\varphi} + \frac{dQ_w}{d\varphi} + c_p T \frac{dm_{\text{VT}}}{d\varphi}; \quad (12)$$

$$\frac{dP}{d\varphi} = \frac{m R}{V} \frac{dT}{d\varphi} + \frac{R T}{V} \frac{dm}{d\varphi} - \frac{P}{V} \frac{dV}{d\varphi}. \quad (13)$$

При определении параметров рабочего тела для режима холодного пуска двигателя функция $\frac{dQ_w}{d\varphi}$, характеризующая динамику отвода теплоты от рабочего тела через локальные теплообменные поверхности деталей, образующих камеру сгорания (головка цилиндра, днище поршня, цилиндр), имеет ряд характерных особенностей. Для этого режима термодинамическое состояние рабочего тела и параметры, входящие в эту функцию, меняются по времени наиболее интенсивно в период процесса сжатия. При этом можно предположить, что вследствие малого по времени длительности периода пуска (несколько секунд) тепловое состояние деталей КС изменяется незначительно. В общем виде текущий обмен теплотой между рабочим телом и стенками камеры сгорания описывался уравнением Ньютона–Рихмана, а коэффициент теплоотдачи α_w от рабочего тела к поверхностям теплообмена деталей, образующих рабочий объем камеры сгорания, определяли по формуле Г. Вошни, исключая при этом фазу сгорания и «горячего» расширения:

$$\alpha_{wk} = 819,5 \cdot D^{-0.2} p^{0.8} T^{-0.546} w^{0.8}, \quad (14)$$

где w – скорость рабочего тела во время сжатия: $w(\varphi) = 2,28 \cdot c_m$;

где p – текущее давление в цилиндре двигателя на такте сжатия-расширения;

D – диаметр цилиндра; c_m – средняя скорость поршня.

Алгоритм модели СГУ был сформирован на основе системы дифференциальных уравнений, описывающих электромеханические процессы в трёхфазной вентильно - индукторной машине:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_k}{dt} = u_k - r_k i_k; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{Z_2}{J_m} (M - M_{np}); \\ \frac{d\varphi}{dt} = \omega, \end{cases} \quad (15)$$

где k - номер фазы, $k = 1,3$; Ψ_k , u_k , i_k - потокосцепление, напряжение и ток k -ой фазной обмотки; ω - угловая частота вращения ротора (вала ДВС); J_m - момент инерции системы «ДВС-СГУ»; Z_2 - число зубцов ротора; $M_{np} = M_T(\varphi) + M_k(\varphi) + M_j(\varphi)$ – суммарный момент на валу системы «ДВС-СГУ».

Результаты совместного математического моделирования системы «ДВС-СГУ» при различных ее температурных состояниях приведены на рис.1,2,3,4.

На рис.1 показан характер изменения расчетных значений среднего давления потерь p_{np} при прокручивании в период пуска двигателя при температуре окружающей среды -10^0 , -20^0 и -30^0 С с использованием масла SAE-5W 30.

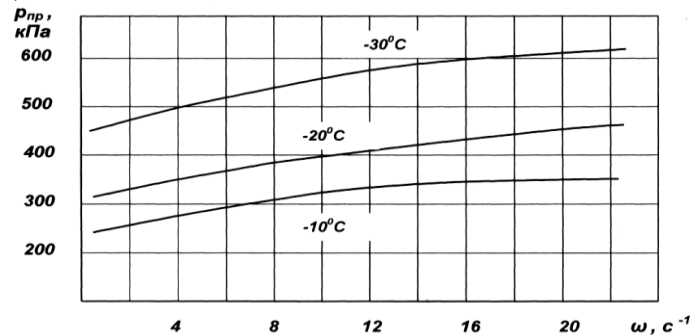


Рис.1. Зависимость расчетной величины среднего давления прокручивания (p_{np}) от угловой скорости коленчатого вала при различном тепловом состоянии ДВС.

На рис.2 в графическом виде приведены результаты сравнительного анализа величин мощностей ДВС (N_{np}) и стартер – генераторной установки ($N_{СГУ}$) в период пускового процесса при температуре окружающей среды -30^0 С.

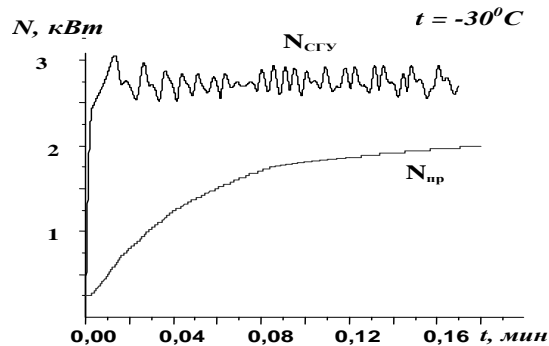


Рис.2. Сравнительный анализ затратных (N_{np}) и располагаемых ($N_{СГУ}$) компонентов энергетического баланса системы «ДВС-СГУ» в период пуска при температуре минус 30^0 С.

На рис.3 и 4 проиллюстрировано изменение показателей пусковой динамики разгона системы «ДВС-СГУ» при температуре окружающей среды минус 10⁰С и минус 30⁰С. Откуда следует, что в течение всего пускового периода величина момента, создаваемого СГУ, превышает момент, необходимый для проворачивания коленчатого вала двигателя, что обуславливает высокую интенсивность разгона системы в целом.

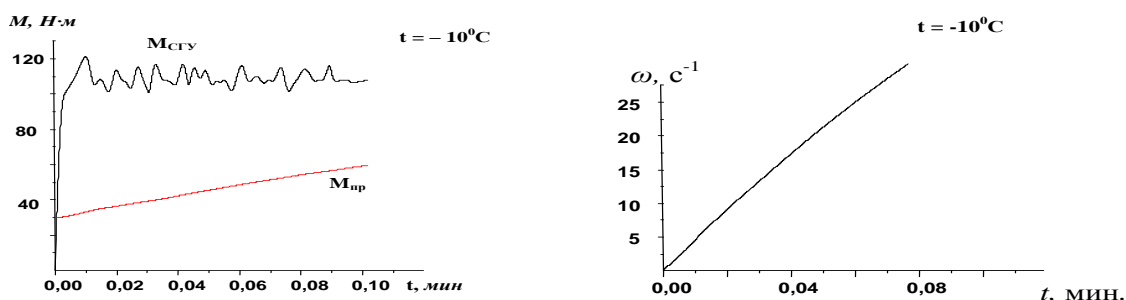


Рис.3. Показатели пусковой динамики разгона системы «ДВС-СГУ» при температуре окружающей среды минус 10⁰С.

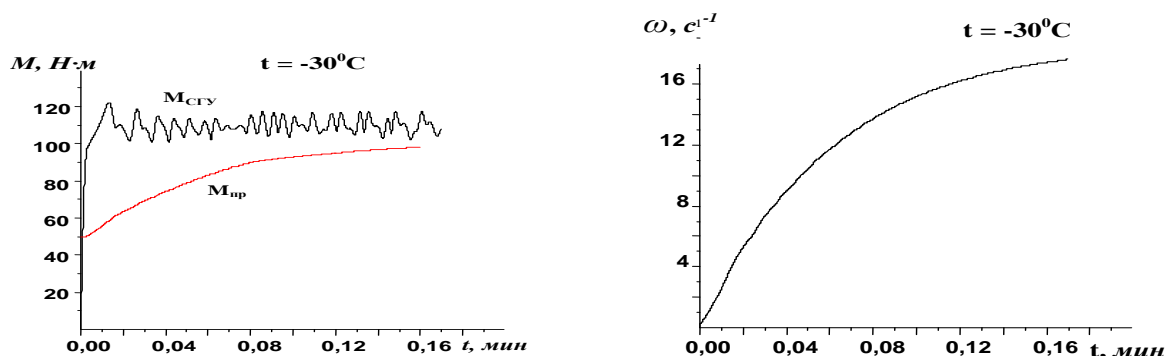


Рис.4. Показатели пусковой динамики разгона системы «ДВС-СГУ» при температуре окружающей среды минус 30⁰С.

В целом, анализ результатов исследования показал, что эффективный пуск холодного двигателя, оснащенного разработанной системой с СГУ и микропроцессорным управлением, реализуется во всем исследованном диапазоне изменения (минус 10...30⁰С) температуры окружающего воздуха без использования специальных средств, облегчающих запуск. При этом пусковые характеристики ДВС соответствуют требованиям технического задания ВАЗ и международным требованиям по пуску бензиновых двигателей легковых автомобилей (минус 27⁰С), обеспечивая при этом даже некоторый запас по эффективности (до минус 30⁰С).

В третьей главе приведено описание опытного варианта системы СГУ с микропроцессорным управлением и разработанной методики ее исследования. В соответствии с целевыми задачами работы с использованием результатов моделирования была разработана система СГУ применительно к ДВС семейства автомобилей ВАЗ с учетом технических требований ОАО «АвтоВАЗ» и в соответствии с евро-

пейскими нормативами. В состав СГУ входят обратимый трехфазный индукторный электродвигатель (ИД), блок управления (БУ), силовой преобразователь тока (СПТ) и теплообменные модули СПТ и ИД, включенные в общую систему жидкостного охлаждения ДВС.

СПТ содержит входной инвертор, который совместно с выпрямителем и фильтром преобразует постоянное напряжение 12В в стабилизированное напряжение 370÷400В и 39÷40В. При работе индукторного двигателя в генераторном режиме, входной инвертор обеспечивает преобразование напряжения 400В в бортовые напряжения 12В и 42В.

БУ размещается в салоне автомобиля. Микропроцессорная система управления обеспечивает управление работой СГУ в целом: пуск, стоп, выявление аварийных режимов работы и диагностирования системы. Для обеспечения гибкости управления выбран микропроцессорный вариант систем управления на базе однокристалльного микроконтроллера. Такое решение направлено на максимальное упрощение электрической схемы, повышение ее надежности и снижение энергопотребления. Микроконтроллер выполнен с 16 разрядной шиной данных, имеет в своем составе элементы для обработки входной информации, вычислений и управления объектами.

По результатам предварительного исследования был разработан опытный вариант трехфазного индукторного двигателя (ИД) для СГУ. ИД выполнен встроенным в конструкцию ДВС и не имеет собственного корпуса и подшипниковых узлов. Подобное решение по размещению электрической машины можно считать установившимся, отработанным по опыту мировой автомобильной промышленности. Электромеханическая часть ИД устанавливается между ДВС и муфтой сцепления, при этом ось ротора является продолжением оси коленчатого вала ДВС, что избавляет конструкцию от промежуточных передач. Ротор выполняет также роль маховика. Основными её элементами являются статор с трехфазной обмоткой и пассивный зубчатый ротор с диском датчика положения ротора. Воздушный зазор между статором и ротором ИД обеспечивается конструкцией элементов ДВС.

Для проведения экспериментальных исследований СГУ в составе ДВС разработана методика проведения испытаний и опытный стенд с двигателем ВАЗ-2112.

В соответствии с разработанной методикой испытаний проводилось:

- определение максимального момента СГУ;
- исследование стартерного режима работы двигателя в составе с СГУ;
- определение времени пуска ДВС при различных значениях температуры;
- определение КПД системы СГУ при различных частотах вращения;
- экспериментальные исследования тепловых режимов работы СГУ.

Для измерения параметров пускового процесса ДВС и регистрации показателей СГУ в составе двигателя были использованы приборы и датчики, основанные на применении электрических методов измерения неэлектрических величин. Приведено описание измерительной аппаратуры стенда с анализом погрешностей измерений. При проведении испытаний использованы следующие горюче-смазочные материалы: бензин АИ-95 (зимний, европейский), масло в двигателе SAE-5W30, масло в коробке передач- ТМ5-9П, охлаждающая жидкость- Тосол А-40.

Комбинированная структурная схема испытаний представлена на рис.5.

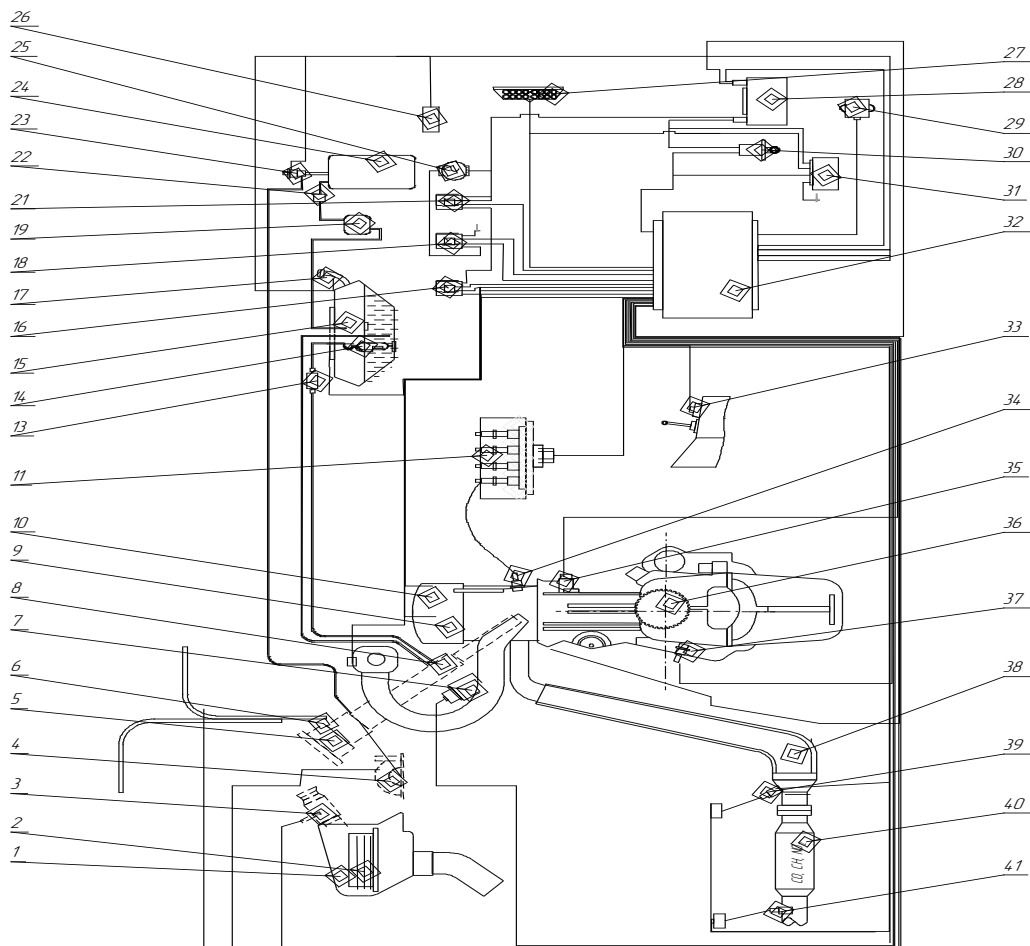


Рис.5. Комбинированная структурная схема испытаний:

1- впускной трубопровод; 2 - элемент фильтрации; 3 - датчик массового расхода воздуха; 4 - датчик положения дроссельной заслонки ; 5 - патрубок дроссельный; 6 - регулятор холостого хода; 8 - рампа топливная с форсунками и регулятором давления топлива; 9 - датчик температуры охлаждающей жидкости; 10 - датчик фаз ; 11- модуль зажигания; 13 - фильтр топливный; 14 - модуль электробензонасоса; 15 - бак топливный ; 16 - реле электробензонасоса; 17 - пробка топливного бака; 18 - реле вентилятора; 19 – сепаратор; 20 - реле главное; 21- клапан гравитационный; 22 - клапан продувки адсорбера; 24 – адсорбер; 25 – электровентилятор; 26 - лампа контрольная; 27 - разъём диагностический; 28 - аккумулятор; 29 – датчик; 30 - замок зажигания; 31- контроллер; 32 - датчик скорости автомобиля; 34 - свеча зажигания; 36 - диск задающий; 37 - датчик положения коленчатого вала; 39 - датчик кислорода управляющий; 40 – нейтрализатор; 41 - датчик кислорода, диагностический.

Четвертая глава диссертации посвящена анализу результатов исследования показателей системы «ДВС-СГУ» с микропроцессорным управлением.

Параметры холодного пуска ДВС представлены в табл. 1. Пусковые свойства ДВС на «зимнем европейском» топливе соответствуют требованиям технического задания (<10 секунд, одна попытка запуска при температуре масла в двигателе минус 27⁰С).

Таблица - Результаты испытаний пускового процесса двигателя

| $T_{окр. ср.}$ Параметры | $+10^{\circ}C$ | $+5^{\circ}C$ | $0^{\circ}C$ | $-5^{\circ}C$ | $-10^{\circ}C$ | $-15^{\circ}C$ | $-20^{\circ}C$ | $-25^{\circ}C$ | $-27^{\circ}C$ |
|--|----------------|---------------|--------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Температура охлаждающей жидкости, $^{\circ}C$ | +10 | +5 | 0 | -5 | -10 | -15 | -20 | -25 | -27 |
| Температура масла в двигателе, $^{\circ}C$ | +10 | +5 | 0 | -5 | -10 | -15 | -20 | -25 | -27 |
| Применяемое топливо (давление насыщенных паров в мм рт. ст.) | 342 | 342 | 342 | 342 | 342 | 342 | 342 | 342 | 342 |
| Заряд АКБ, % | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Время до первой вспышки, сек. | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1 | 1 | 1...2 | 2...3 | 2...3 | 2...3 |
| Время запуска, сек. | 1 | 1 | 1...2 | 1...2 | 2...3 | 3...4 | 4...5 | 6...8 | 7...9 |
| Количество попыток запуска | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Частота вращения коленвала на запуске (мин./макс.), $мин^{-1}$ | 130 | 130 | 120 | 110 | 100 | 95 | 85 | 80 | 70 |
| Напряжение АКБ на запуске (мин./макс.), В | 10 | 10 | 9,2 | 9,05 | 8,96 | 9,3 | 8,04 | 8,01 | 7,78 |
| Принятие нагрузки (при отпуске сцепления), заглох/не заглох | не заглох | не заглох | не заглох | не заглох | не заглох | не заглох | не заглох | не заглох | не заглох |

С понижением температуры окружающего воздуха время запуска двигателя увеличивается (рис.6). При температуре $-10^{\circ}C$ частота вращения вала ДВС соответствовала $100 мин^{-1}$, а при температуре минус $27^{\circ}C$ – $70 мин^{-1}$.

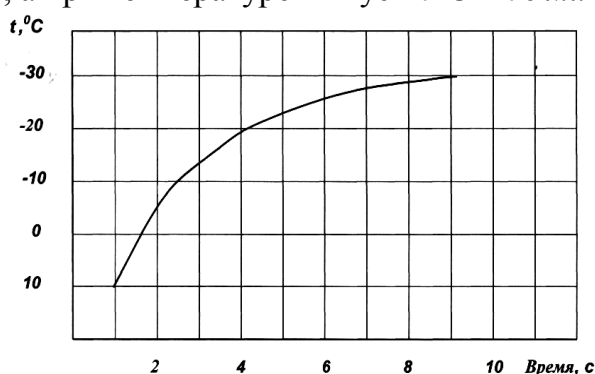


Рис.6. Зависимость времени запуска двигателя от температуры окружающей среды.

В генераторном режиме СГУ с достаточно высоким КПД развивает электрическую мощность до $4,5 кВт$.

Обобщая данные проведенного исследования можно заключить, что результаты эксперимента подтвердили данные расчетного прогнозирования, технические характеристики опытной системы с СГУ и микропроцессорным управлением соответствуют техническим требованиям ВАЗ и европейского законодательства, а, следовательно, целевым задачам данного исследования.

В заключении следует отметить, что концепция создания для отечественных транспортных средств систем с СГУ с микропроцессорным управлением представляется достаточно перспективной. Практическая реализация подобной концепции не требует переналадки существующих технологий двигателестроительной отрасли, и не связана с серьезными техническими и финансовыми затратами. Основным элементом системы – СГУ представляет собой обычную индукторную электрическую машину. Массовые и габаритные параметры СГУ обеспечивают удобство его компоновки на двигателе без изменения его базовой конструкции.

Важным стимулом дальнейшего развития разработанной по результатам данного исследования комплексной стартер – генераторной системы с микропроцессорным управлением является то, что она обладает функциональными возможностями совокупного совершенствования ДВС и автомобиля, в частности:

1. Обеспечивает высокий пусковой момент ($100 \text{ Н}\cdot\text{м}$) и эффективный запуск (менее 10 с) автомобильного ДВС в условиях низких температур (до -30°C) без специальных средств предпусковой подготовки.
2. Генерирует многоуровневую электрическую энергию напряжением 12V , 24V , 36V для всех бортовых потребителей, развивая электрическую мощность до $4,5 \text{ кВт}$.
3. Выполняет функции электромагнитного демпфирования крутильных колебаний вала ДВС. Обладает возможностью выполнения демпфирования с дискретной частотой и переменными амплитудами, а также возможностью снижения вибраций при изменении нагрузки.
4. В автоматическом режиме выполняет функции системы «Stop and Go», которая отключает ДВС при отсутствии нагрузки и в режиме закрытой дроссельной заслонки и быстро включает его при нажатии на педаль газа, обеспечивая при этом значительную экономию топлива в городском режиме движения.
5. Обеспечивает частичную гибридизацию энергетической установки автомобиля. Электродвигатель, питаемый от аккумулятора, развивает вращающий момент, достаточный для интенсивного разгона автомобиля, работая совместно с ДВС.

При соответствующей ее модернизации она потенциально способна выполнять ряд других важных функций, в том числе:

1. Стартер – генераторная установка может аккумулировать тормозную энергию автомобиля, обеспечивая значительную экономию топлива в условиях городского ездового цикла.
2. Система, содержащая высокоэффективную электрическую машину, способна реализовать быстрый старт автомобиля, позволяет управлять автомобилем на низких скоростях с выключенным ДВС, обеспечивая удобство управления автомобилем и существенное повышение экологической безопасности в зонах интенсивного движения транспорта.
3. Система способна компенсировать переходные процессы во время переключения передач, исключая прерывание силового потока к ведущим колесам автомобиля, снижая динамические нагрузки в элементах трансмиссии.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Сформулирована и методически обоснована концепция обеспечения низкотемпературного (до минус 30°C) пуска двигателя с искровым зажиганием, оснащенного комплексной стартер – генераторной системой с микропроцессорным управлением операций пуска и генерирования бортовой энергии.
2. Разработана методика расчета параметров пускового процесса системы «ДВС-СГУ» на основе совместного моделирования рабочих процессов двигателя и электрической машины, позволяющая проводить поиск рациональных решений при организации режимов пуска в указанных условиях.
3. С использованием разработанной методики проведены численные эксперименты с целью определения энергетических и динамических (разгонных) характеристик системы «ДВС-СГУ» в зависимости от температуры окружающей среды. Установлено, что в стартерном режиме СГУ обеспечивает момент на валу ДВС $100 \text{ Н}\cdot\text{м}$. При температуре -30°C СГУ раскручивает коленчатый вал ДВС до частоты вращения 70 мин^{-1} в течении 9 с , обеспечивая запуск двигателя с первой попытки.
4. Проведен комплекс экспериментальных исследований с целью проверки достоверности разработанной методики и результатов расчетного анализа, а также определения соответствия пусковых характеристик разработанного СГУ применительно к двигателям автомобилей семейства ВАЗ требованиям технического задания. Исследования проводились в климатической камере ВАЗ по заводской методике с использованием бензина АИ 95 «Европейский зимний» и моторного масла SAE-5W30. Установлено, что пусковые свойства ДВС на указанных марках топлива и масла, как и прогнозировалось расчетом, соответствуют требованиям технического задания (<10 секунд, одна попытка запуска при температуре масла в двигателе минус 27°C).
5. Проведена систематизация и обобщение полученных теоретических и практических результатов исследования с учетом возможности их распространения на все типы перспективных отечественных легковых автомобилей с механической трансмиссией.
6. Методически обоснован выбор параметров стартер – генераторного устройства на базе вентильного индукторного электродвигателя применительно к ДВС автомобиля ВАЗ 2112; разработана техническая документация по компоновке СГУ в картере сцепления без существенных изменений конструкции двигателя и трансмиссии.
7. Результаты диссертационной работы использованы при выполнении научно – исследовательских и опытно – конструкторских работ Федеральной целевой программы «Развитие автомобильной промышленности России на период до 2005 года». А также подпрограммы «Исследование, разработка и выпуск опытно – промышленных партий стартер – генераторных установок с многоуровневым напряжением и электронным управлением для комплектации легковых автомобилей производства 2005...2010г.г.».

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Алиев А. Я., Реднов Ф. А. Стартер-генераторное устройство для перспективных легковых автомобилей // Автомобильное электрооборудование, конструкции, материалы, технология, проблемы перевода АТЭ на напряжение питания 42В.: Тез. докл. Международного симпозиума, г. Суздаль - 2001. С. 24-25. (Автор - 60%).
2. Алиев А. Я., Арабов Н. Я. Разработка и производство электрооборудования для легковых автомобилей – основное направление развития предприятия// Научно-технический журнал "Автотракторное электрооборудование". – 2001. №3 - 4. С. 18-19. (Автор – 60%).
3. Реднов Ф. А., Пахомин С. А., Алиев А. Я. Стартер - генераторное устройство с реактивной индукторной машиной// Научно-технический журнал "Автотракторное электрооборудование". - 2003. №3. С. 18-19. (Автор – 35%).
4. Реднов Ф. А., Пахомин С. А., Алиев А. Я. Стартер - генераторное устройство для автомобилей семейства ВАЗ // Известия ВУЗов. Электромеханика. - 2004 №1-С.68-69. (Автор – 35%).
5. Алиев А. Я., Аливагабов М. М., Фатахов М. М. Пути снижения механических потерь в малоразмерном двигателе// Известия ВУЗов. Сев. Кав. регион. «Технические науки». 2005. Приложение №1. С. 83 - 86. (Автор – 45%).
6. Астемиров Т. А., Фаталиев Н. Г., Алиев А. Я., Сайгитов Р. Э. Стартер - генераторное устройство для автомобилей//Основные проблемы, тенденции и перспективы устойчивого развития производства. Сборник статей. Материалы Международной научно – практической конференции, посвященной 80-летию профессора Джамбулатова М. М.- Махачкала. - 2006. С. 104-105. (Автор – 30%).