

Учредитель ООО "Научно-техническое издательство  
"Инновационное машиностроение"

Главный редактор **И. Ф. ГУМЕРОВ**, канд. техн. наук,  
заместитель генерального директора ПАО "КАМАЗ" —  
директор по развитию

Заместитель главного редактора **А. С. САВЧЕНКО**

Редакционный совет

**В. С. Антипенко**,  
д-р техн. наук, проф.  
**Е. В. Балакина**,  
д-р техн. наук, проф.  
**Д. Х. Валеев**,  
д-р техн. наук  
**Ю. Э. Васильев**,  
д-р техн. наук, проф.  
**С. М. Гайдар**,  
д-р техн. наук, проф.  
**Л. В. Грехов**,  
д-р техн. наук, проф.  
**В. А. Зорин**,  
д-р техн. наук, проф.  
**М. Ю. Карелина**,  
д-р техн. наук, проф.  
**Н. Т. Катанаев**,  
д-р техн. наук, проф.  
**В. Н. Козловский**,  
д-р техн. наук, проф.  
**В. В. Комаров**,  
канд. техн. наук  
**А. В. Кочетков**,  
д-р техн. наук, проф.

**В. А. Марков**,  
д-р техн. наук, проф.  
**Л. Б. Миротин**,  
д-р техн. наук, проф.  
**А. Н. Новиков**,  
д-р техн. наук, проф.  
**А. Н. Ременцов**,  
д-р пед. наук, проф.  
**О. Н. Румянцева**,  
генеральный директор  
ООО "Издательство  
"Инновационное  
машиностроение"  
**А. Ф. Синельников**,  
канд. техн. наук, проф.  
**А. А. Солнцев**,  
д-р техн. наук, проф.  
**В. С. Устименко**,  
канд. техн. наук  
**Х. А. Фасхиев**,  
д-р техн. наук, проф.  
**Н. Д. Чайнов**,  
д-р техн. наук, проф.

Корпункт:

Я. Е. Карповский (г. Минск)

Адрес редакции:

107076, Москва, Колодезный пер., дом 2-а, стр. 12  
Тел. (499) 269-48-96  
E-mail: [gruzovik.mashin.ru](mailto:gruzovik.mashin.ru); [gruzovik.mashin@gmail.com](mailto:gruzovik.mashin@gmail.com),  
<http://www.mashin.ru>

Адрес издательства:

107076, Москва, Колодезный пер., дом 2-а, стр. 2  
Тел. (495) 661-03-36

Журнал зарегистрирован Федеральной службой  
по надзору в сфере связи, информационных технологий  
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).  
Регистрационный номер ПИ № ФС 77-63955  
от 09.12.2015 г.

Подписной индекс:

по объединенному каталогу  
"Пресса России" 39799

ООО «Издательство «Инновационное машиностроение»,  
"Грузовик", 2020

Перепечатка материалов из журнала «Грузовик» возможна при  
обязательном письменном согласовании с редакцией журнала. При  
перепечатке материалов ссылка на журнал «Грузовик» обязательна.  
За содержание рекламных материалов ответственность несет  
рекламодатель.

## В НОМЕРЕ:

### Конструкция

- 3** *Мальшев А. Н., Дебелов В. В., Козловский В. Н.* Разработка концепции комплекса имитационного и физического моделирования гибридной силовой установки транспортного средства

В статье представлены результаты разработки концепции комплексного моделирования гибридной силовой установки транспортного средства. В ходе разработки комплекса имитационных и физических моделей компонентов был использован способ разработки от более простых моделей к более сложным, что позволило создать гибкую модульную структуру модели гибридной силовой установки и дало возможность изменять или дополнять модель в процессе разработки всей системы, когда некоторые компоненты были недоступны и заменялись имитационными моделями. Для быстрого изменения состава системы в аппаратно-программном комплексе без изменения всей модели были предусмотрены унифицированные интерфейсы и взаимосвязи между моделями компонентов

- 14** *Антипенко В. С., Лебедев С. А.* Комбинированные источники тока в системе пуска грузовых автомобилей

При пуске дизеля грузовика системой электростартерного пуска с комбинированным источником тока создаются более благоприятные условия для работы дизеля: за счет увеличения углового ускорения коленчатого вала уменьшается время его работы в условиях полусухого трения, а за счет сокращения времени пуска уменьшается количество несгоревшего топлива, скапливающегося в цилиндрах в начальный момент времени. Все это повышает надежность работы дизеля и снижает непроизводительные затраты топлива, уменьшает выброс вредных веществ в атмосферу. Использование накопителя энергии в дополнение к аккумуляторной батарее позволило не только уменьшить емкость аккумуляторных батарей в 2 раза, но и снизить токовые нагрузки на них при стартерных режимах разряда, что увеличивает ресурс батарей-модулей и приближает его к ресурсу накопителей энергии, а также гарантировать запуск двигателя в зимнее время (особенно в Заполярье)

### Исследования. Расчет

- 22** *Тарасик В. П.* Оценка управляемости и устойчивости автомобиля при движении на вираже

Предложена математическая модель и разработана на ее основе методика компьютерной имитации движения автомобиля на вираже. На примере грузового автомобиля категории N3 проведено исследование управляемости и устойчивости и приведены полученные графики, иллюстрирующие изменение характеристик управляемого движения. Определены критические режимы движения, обуславливающие отрыв колес от поверхности дороги и боковое скольжение. При заданной кривизне траектории определена предельная скорость управляемого движения

- 30** *Пузаков А. В., Смирнов Д. А.* Разработка нагрузочного режима стартерной аккумуляторной батареи

Для оперативного мониторинга технического состояния стартерной аккумуляторной батареи необходимо знать, как изменятся ее параметры в процессе эксплуатации. Выявление неисправностей аккумуляторной батареи возможно на основе сравнительной оценки изменения выходного напряжения в типовых нагрузочных режимах. Целью статьи является разработка нагрузочного режима, содержащего четыре последовательных стадии нагружения с вариацией разрядного тока и времени нагружения. Экспериментально установлено изменение выходного напряжения как работоспособной аккумуляторной батареи, так и в результате моделирования характерных неисправностей. Дальнейшие исследования будут направлены на составление массива данных для системы оперативного диагностирования стартерных аккумуляторных батарей на борту транспортного средства.

### Эксплуатация. Ремонт

- 35** *Овсянников В. Е., Васильев В. И.* Повышение долговечности чугунных гильз двигателей строительно-дорожных машин

В предлагаемой статье рассмотрена возможность применения термомодифицированной поверхности легирования для повышения долговечности гильз двигателей строительно-дорожных машин. Показано, что использование упрочнения позволяет получать слой толщиной до 3 мм. При этом долговечность после ремонтного растачивания не снижается ввиду обратного распределения твердости в упрочненном слое

### Экология

- 39** *Грушиников В. А.* Мероприятия по совершенствованию экологической безопасности автомобильного транспорта. Часть 3

Экологично безопасная в эксплуатации на автомобильных дорогах общего пользования, без учета нагрузки на окружающую среду в процессе генерирования электроэнергии, электрифицированная система автомобильного привода с разной степенью успешности осуществляется различными технологиями, пока еще слишком затратными для массовой реализации в практических транспортных приложениях

### Безопасность

- 45** *Морозов Д. А., Хмельницкий С. В., Ковалев В. А., Руденко П. Г.* Разработка модели ДТП при наезде автомобиля на статичное препятствие

В работе предложена модель дорожно-транспортного происшествия при наезде автомобиля на локальный дорожный подъем, которая позволяет произвести расчет скорости на момент наезда с учетом параметров последующего перемещения транспортного средства и его механического взаимодействия в результате перемещения с неподвижным препятствием. Предложенная модель позволяет учесть затраты кинетической энергии автомобиля на последующее перемещение и механическую работу деформации неподвижного препятствия

## SCIENTIFIC-TECHNICAL AND INDUSTRIAL MAGAZINE

Founder JSC Scientific and Technical Publishing House  
"Innovative Engineering"

Editor-in-Chief I. F. GUMEROV, cand. tehn. s.,  
deputy general director JSC "KAMAZ" —  
director of development

Deputy Editor-in-Chief A. S. SAVCHENKO

### Editorial council

V. S. Antipenko,

dr. en. s., prof.

E. V. Balakina,

dr. en. s., prof.

D. H. Valeev,

dr. en. s.

Ju. E. Vasilyev,

dr. en. s., prof.

S. M. Gaidar,

dr. en. s., prof.

L. V. Grekhov,

dr. en. s., prof.

V. A. Zorin,

dr. en. s., prof.

M. Ju. Karelina,

dr. en. s., prof.

N. T. Katanaev,

dr. en. s., prof.

V. N. Kozlovsky,

dr. en. s., prof.

V. V. Komarov,

cand. tehn. s.

A. V. Kochetkov,

dr. en. s., prof.

V. A. Markov,

dr. en. s., prof.

L. B. Mirotnin,

dr. en. s., prof.

A. N. Novikov,

dr. en. s., prof.

A. N. Rementsov,

dr. hab. phd in en. s.

O. N. Rumyantseva,

gen. dir. JSC "Publisher

"Innovative Engineering"

A. F. Sinelnikov,

cand. tehn. s., prof.

A. A. Solntsev,

dr. en. s., prof.

V. S. Ustyenko,

cand. tehn. s.

J. A. Faskhiyev,

dr. en. s., prof.

N. D. Chaynov,

dr. en. s., prof.

## CONTENTS:

### Design

- 3** Malyshev A. N., Debelov V. V., Kozlovsky V. N. Development of the concept of a complex for imitation and physical modeling of a hybrid power plant of a vehicle

*The article presents the results of the development of the concept of integrated modeling of a hybrid propulsion system of a vehicle. During the development of a complex of simulation and physical models of components, a development method was used from simpler models to more complex ones, which made it possible to create a flexible modular structure of the hybrid power plant model and made it possible to change or supplement the model during the development of the entire system, when some components were unavailable and were replaced. simulation models. To quickly change the composition of the system in the hardware and software complex without changing the entire model, unified interfaces and relationships between component models were provided*

- 14** Antipenko V. S., Lebedev S. A. The combined current sources in the truck start-up system

*When starting the diesel truck's system, starting with a combined current source creates more favorable conditions for the operation of the diesel engine: due to the increase in angular acceleration of the crankshaft is reduced while working in conditions of dry friction, and by reducing start-up time reduces the quantity of unburned fuel accumulating in the cylinders at the initial moment of time. All this increases the reliability of the diesel engine and reduces unproductive fuel costs, reduces the emission of harmful substances into the atmosphere. The use of an energy storage device in addition to the battery allowed not only to reduce the capacity of batteries by 2 times, but also to reduce the current loads on them during starter discharge modes, which increases the resource of battery modules and brings it closer to the resource of energy storage devices, as well as to guarantee engine start in winter (especially in the Arctic)*

### Research. Calculation

- 22** Tarasik V. P. Assessment of roadability and stability of a vehicle movement on the bend

*The paper presents the mathematical model and the technique of computer imitation of a vehicle movement on bend. Research of roadability and stability of the truck and the schedules illustrating change of characteristics of the steered movement have been obtained. The critical modes of the movement causing separation of wheels from road surface and side slippage have been defined. Speed limit of the steered movement on trajectory of the set curvature have been determined*

- 30** Puzakov A. V., Smirnov D. A. Development of starter battery load mode

*For operational monitoring of the technical condition of the starter battery, it is necessary to know how its parameters change during operation. Detection of battery failures is possible based on a comparative assessment of changes in the output voltage in typical load modes. The purpose of the article is to develop a load mode containing four successive loading stages with variations in the discharge current and loading time. Experimentally, the change in the output voltage of both a working battery and because of simulating characteristic faults has been established. Further research will be aimed at compiling an array of data for the system of rapid diagnostics of starter batteries on-board the vehicle*

### Operation. Repair

- 35** Ovsyannikov V. E., Vasiliev V. I. Increasing the durability of cast iron casings of engines of construction and road machines

*The proposed article considers the possibility of using thermodiffusion surface doping to increase the durability of motor casings of construction-road machines. It is shown that the use of hardening allows to obtain a layer with a thickness of up to 3 mm. At the same time, the durability after repair stretching does not decrease due to the reverse hardness distribution in the reinforced layer*

### Ecology

- 39** Grushnikov V. A. Measures to improve environmental safety of vehicle transport. Part 3

*Ecologically safe in operation on public roads, without taking into account the environmental load in the process of generating electricity, an electrified car drive system with varying degrees of success is carried out by various technologies that are still too costly for mass implementation in practical transport applications*

### Safety

- 45** Morozov D. A., Khmelitsky S. V., Kovalev V. A., Rudenko P. G. Development of a model of road accident when a car hits a static obstacle

*The paper proposes a model of a traffic accident when a car hits a local road lift, which allows calculating the speed at the time of collision, taking into account the parameters of the subsequent movement of the vehicle and its mechanical interaction as a result of moving with a fixed obstacle. The proposed model allows you to take into account the cost of the kinetic energy of the car for the subsequent movement and mechanical work of the deformation of a stationary obstacle*

### Correspondent's office:

Ya. E. Karpovsky (Minsk)

### Address of the editorial office:

107076, Moscow, Kolodezny Lane, house 2-a, str. 12  
Ph. (499) 269-48-96  
E-mail: gruzovik@mashin.ru; gruzovik.mashin@gmail.com;  
http://www.mashin.ru

### Address of publishing house:

107076, Kolodezny Lane, house 2-a, str. 2  
Ph. (495) 661-03-36

The magazine is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications (Roskomnadzor).

Registration number PI number FS77.-63955  
on December 9, 2015

### Subscription index:

according to the integrated catalog  
"Press of Russia" 39799

**А. Н. Малышев**, ФГУП "НАМИ", г. Москва, **В. В. Дебелов**, канд. техн. наук, ФГУП "НАМИ", г. Москва,

**В. Н. Козловский**, д-р техн. наук, профессор, e-mail: kozlovskiy-76@mail.ru, ФГБОУ ВО "СамГТУ", г. Самара

## РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ КОМПЛЕКСА ИМИТАЦИОННОГО И ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

*В статье представлены результаты разработки концепции комплексного моделирования гибридной силовой установки транспортного средства. В ходе разработки комплекса имитационных и физических моделей компонентов был использован способ разработки от более простых моделей к более сложным, что позволило создать гибкую модульную структуру модели гибридной силовой установки и дало возможность изменять или дополнять модель в процессе разработки всей системы, когда некоторые компоненты были недоступны и заменялись имитационными моделями. Для быстрого изменения состава системы в аппаратно-программном комплексе без изменения всей модели были предусмотрены унифицированные интерфейсы и взаимосвязи между моделями компонентов.*

**Ключевые слова:** энергоэффективность, экология, электропривод, автомобильная гибридная силовая установка, имитационное моделирование.

*The article presents the results of the development of the concept of integrated modeling of a hybrid propulsion system of a vehicle. During the development of a complex of simulation and physical models of components, a development method was used from simpler models to more complex ones, which made it possible to create a flexible modular structure of the hybrid power plant model and made it possible to change or supplement the model during the development of the entire system, when some components were unavailable and were replaced. simulation models. To quickly change the composition of the system in the hardware and software complex without changing the entire model, unified interfaces and relationships between component models were provided.*

**Keywords:** energy efficiency, ecology, car hybrid powerplant, simulation.

### Введение

В настоящее время с введением законодательных норм к токсичности транспортных средств и их энергоэффективности (ЕС 92/75/СЕЕ, 94/2/СЕ, 95/12/СЕ, 96/89/СЕ, 2003/66/СЕ, Corporate Average Fuel Economy (SAFE), Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации", ГОСТ Р 58554—2019 Автомобильные транспортные средства. Показатели энергоэффективности и экологии. Способы информирования потребителей, Правила ЕЭК ООН № 101, ГОСТ Р 58554—2019) численность гибридных автомобилей растет с каждым днем. Требованиями регламентированы выбросы СН, СО и NO<sub>x</sub>, измеряемые в г/км. Большинство авто-

производителей стремятся к тому, чтобы создать собственный гибридный автомобиль, что способствует росту числа разработок в данном направлении и развитию применяемых технологий.

Основным преимуществом гибридных автомобилей можно назвать пониженное потребление топлива за счет перераспределения крутящего момента между ДВС и тяговым электроприводом, а также сокращением времени работы ДВС. Во время стоянки и разгона транспортного средства ДВС остается выключен или работает в оптимальном режиме, потребляя меньшее количество топлива, за счет чего в городском цикле расход топлива снижается на 10—30 %. В режиме движения по трассе показатели потребления топлива незначительно отличаются от автомобилей с традиционным ДВС, но при движении с ускорением или при обгоне используется дополни-

тельный крутящий момент электропривода, что способствует сокращению общего расхода топлива. В случае оснащения автомобиля параллельной или смешанной гибридной установкой имеется возможность уменьшить мощность и размеры ДВС, поскольку современный электропривод обладает большим КПД и мощностью при меньшей массе и габаритах. Зачастую мощность и крутящий момент электропривода подбирают таким образом, что они составляют порядка 50 % от мощности силового агрегата, а мощность силового агрегата уменьшают примерно на 30 % относительно расчетной мощности для заданного автомобиля.

В результате оснащения автомобиля гибридной силовой установкой с тяговым электроприводом удается достичь потребления топлива 4–7 л/100 км в городском цикле, в то время как расход топлива у автомобиля с традиционным ДВС того же класса составляет 10–12 л/100 км. В результате сниженного расхода топлива происходит уменьшение выбросов токсичных и вредных веществ в атмосферу (продуктов горения углеводородной смеси). При кратковременной остановке ДВС и заряженной высоковольтной батарее у гибридного автомобиля работа всех систем обеспечивается за счет энергии, накопленной в АКБ. Электродвигатель обеспечивает быстрый запуск ДВС.

Добиться показателей эффективности и снизить уровень вредных выбросов возможно за счет применения специальной стратегии управления компонентами и системами, являющихся частью гибридной силовой установки. Процесс разработки и проверки стратегии управления гибридной силовой установки достаточно сложен и занимает много времени. Это связано с тем, что в состав системы входит большое количество ЭБУ, контролирующих работу компонентов, таких как: ДВС, силовой инвертор для электромашины, силовой преобразователь напряжения, автоматическая коробка переключения передач. Поэтому важной и актуальной задачей является выполнение комплекса работ, связанных с разработкой и испытанием систем управления гибридной силовой установкой средствами математического и имитационного моделирования систем гибридной силовой установки.

## Постановка задачи

Создание комплекса имитационного и физического моделирования гибридной силовой установки транспортного средства требует решения комплекса задач, связанных с выбором схемы гибрида, опре-

деления состава и основных характеристик систем и компонентов, составлением списка критериев и определение их граничных значений для оценки достоверности результатов имитационного и физического моделирования. Все это требует создания концепции будущей гибридной системы и выбора технологии осуществления математического и имитационного моделирования ее составных частей, определения режимов работы гибридной силовой установки, определения требований к модели водителя и окружающей среды, а также автомобиля, в котором располагается гибридная силовая установка.

Необходимость создания концепции обусловлено тем, что она позволит ограничить множество факторов, которые способствуют выбору наиболее оптимальных методов имитации работы компонентов и физических величин выходных сигналов с целью использования полученного комплекса для проведения моделирования работы гибридной системы и оптимизации режимов работы силовой установки и системы управления.

Основные задачи, которые требуют решения при создании концепции комплекса имитационного и физического моделирования:

1. Анализ систем, входящих в состав гибридной силовой установки и определение критериев оптимальности работы.
2. Разработка математической имитационной MATLAB Simulink модели гибридной силовой установки, включающей в себя модель ДВС, электромашины, силового инвертора и высоковольтной батареи.
3. Параметризация математических и имитационных моделей ДВС, электромашины и высоковольтной батареи с использованием экспериментальных данных, полученных на испытательных стендах, для обеспечения точности воспроизведения характеристик реального объекта.
4. Создание физической модели объекта управления для электронных систем управления ДВС, инвертора и высоковольтной батареи, содержащих алгоритмы управления этими компонентами.
5. Анализ режимов работы гибридной силовой установки с использованием комплекса имитационного и физического моделирования по ездовым циклам движения автомобиля.

## 1. Анализ систем, входящих в состав гибридной силовой установки и определение критериев оптимальности ее работы

Широко распространены несколько видов гибридных силовых установок по принципу передачи крутящего момента: последовательный,

# КОНСТРУКЦИЯ

параллельный и смешанный гибрид. В работе будет рассматриваться система с "параллельной" гибридной силовой установкой. Ее особенность в том, что ведущие колеса приводятся в движение посредством передачи крутящего момента от ДВС и электромашин, которая может работать в качестве генератора, стартера и тягового привода.

Рассмотрим основные системы, входящие в состав параллельной гибридной силовой установки и их взаимосвязи (рис. 1).

Гибридная силовая установка включает в себя электронные системы, которые обеспечивают работу силовых агрегатов: система управления двигателем внутреннего сгорания и система преобразования электрической энергии и управления тяговым электроприводом. Силовые агрегаты (ДВС и тяговый электропривод) соединены с коробкой переключения передач. Рассмотрим более подробно компоненты гибридной силовой установки.

*ДВС (двигатель внутреннего сгорания)* — это тепловой двигатель, в котором химическая энергия топлива, сгорающего в камере сгорания, преобразуется в механическую работу. В автомобилях используются поршневые двигатели, в которых работа расширения газообразных продуктов сгорания углеводородного топлива производится в цилиндре и воспринимается поршнем, возвратно-поступательное движение которого преобразуется во вращательное движение коленчатого вала, и передается на выходной вал.

В качестве примера рассмотрим V-образный 8-цилиндровый верхневальный 32-клапанный двигатель с непосредственным впрыском, систе-

мой изменяемых фаз газораспределения VVT, двумя турбокомпрессорами, рабочим объемом 4,4 л и максимальной мощностью более 400 кВт при 5000 мин<sup>-1</sup>.

Основным показателем эффективности работы ДВС в гибридной силовой установке является удельный эффективный расход топлива — отношение расхода топлива в единицу расстояния или времени к мощности [г/(кВт·ч)]. На графике (рис. 2) ниже представлена зависимость удельного эффективного расхода топлива (BSFC — Brakespecificfuelconsumption) от частоты вращения двигателя и среднего эффективного давления в камере сгорания, рассчитанного по измеренному крутящему моменту (BMEP — Brakeeffectivepressure). Зависимость получена экспериментальным путем на двигателемном стенде с изменяемой нагрузкой.

Параметр среднего эффективного значения тормозного давления BMEP соответствует эффективной работе, отнесенной к единице рабочего объема двигателя. Используется для оценки нагрузки одного и того же двигателя на разных режимах работы и рассчитывается по формуле

$$P_{me} = \frac{W}{V_d} = 2\pi n_c \frac{T}{V_d},$$

где  $W$  — работа за цикл, Дж;  $P_{me}$  — среднее эффективное давление, Па;  $V_d$  — рабочий объем ДВС, м<sup>3</sup>;  $n_c$  — число оборотов на рабочий ход;  $T$  — крутящий момент двигателя, измеренный динамометрическим стендом на выходном валу ДВС.

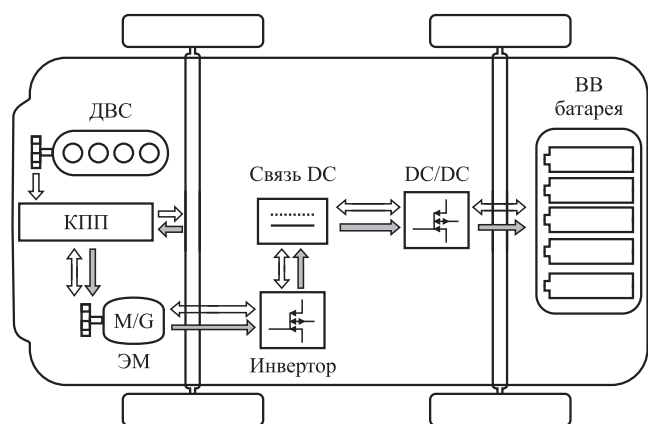


Рис. 1. Структура "параллельной" гибридной силовой установки

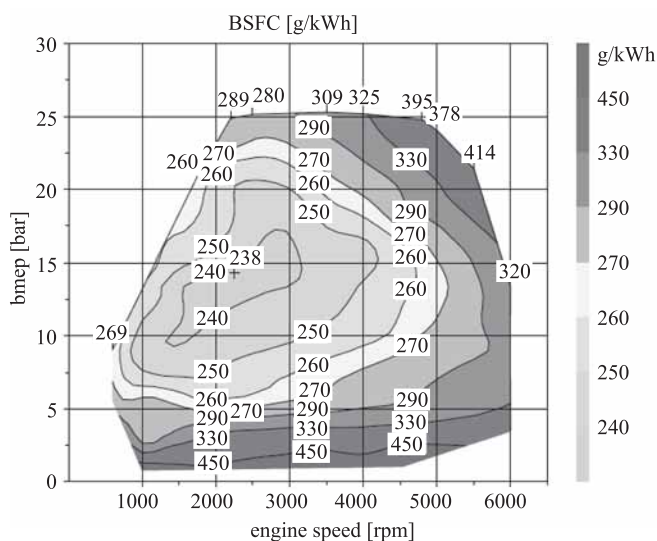


Рис. 2. Удельный эффективный расход топлива BSFC

Зная удельный эффективный расход топлива и его теплотворную способность, можно определить эффективное КПД ДВС. Описанное соотношение необходимо для оценки эффективности работы ДВС и точной настройки режимов работы гибридной силовой установки.

Эффективный КПД ДВС описывается соотношением

$$\eta_e = 1/g_e Q_H,$$

где  $g_e$  — удельный эффективный расход топлива в кг на 1 Дж;  $Q_H$  — низшая теплотворность топлива в Дж/кг.

Другим важным критерием эффективности работы ДВС является количество вредных выбросов, данные о которых используются при настройке режимов работы гибридной силовой установки. На рис. 3, 4 и 5 представлены характеристики выбросов  $CO_2$ , CO и HC в окружающую среду.

*Электромашин*а помимо пуска ДВС еще выполняет функции тягового привода и соединена непосредственно с ДВС и коробкой передач (КП). В работе используется трехфазная синхронная электромашинa с постоянными магнитами, которая содержит 10 пар полюсов. Постоянные магниты в роторе электромашины размещены в шесть рядов с небольшим угловым смещением относительно друг друга, это уменьшает неравномерность вращения ротора. Включение обмоток статора выполнено по схеме "звезда". Статор оснащен рубашкой охлаждения, включенной в отдельный контур протекания охлаждающей жидкости (рис. 6).

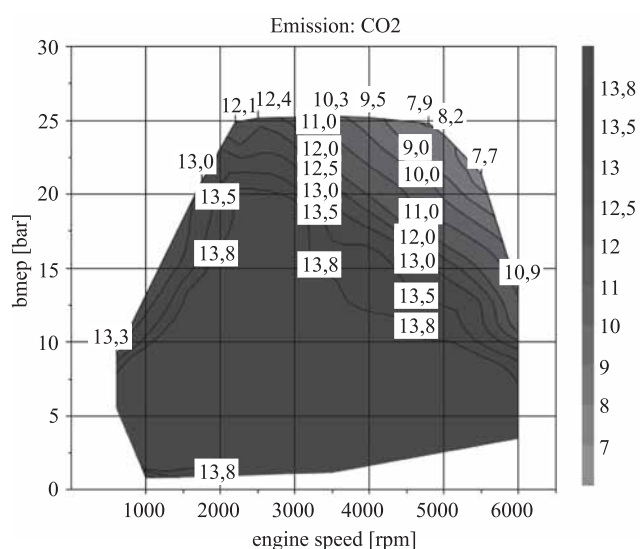


Рис. 3. Выбросы  $CO_2$  в окружающую среду

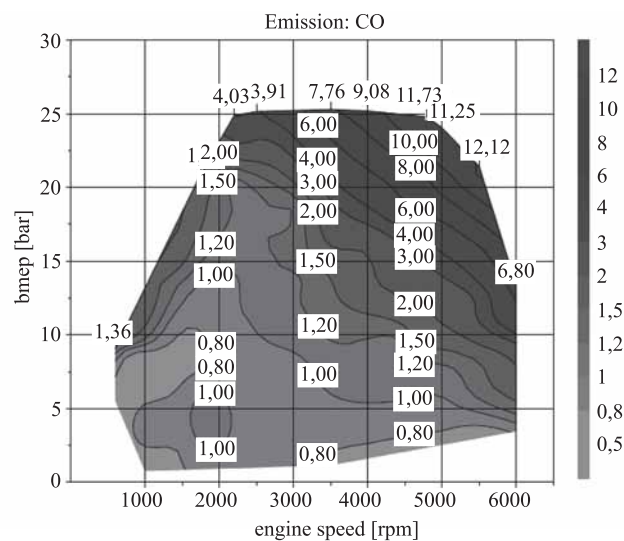


Рис. 4. Выбросы CO в окружающую среду

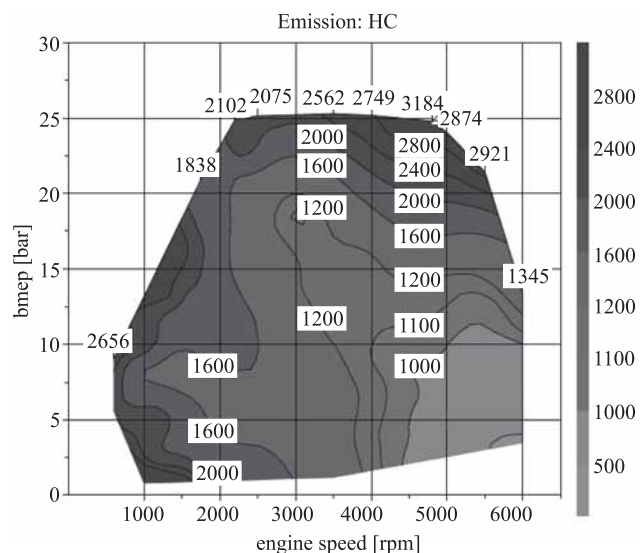
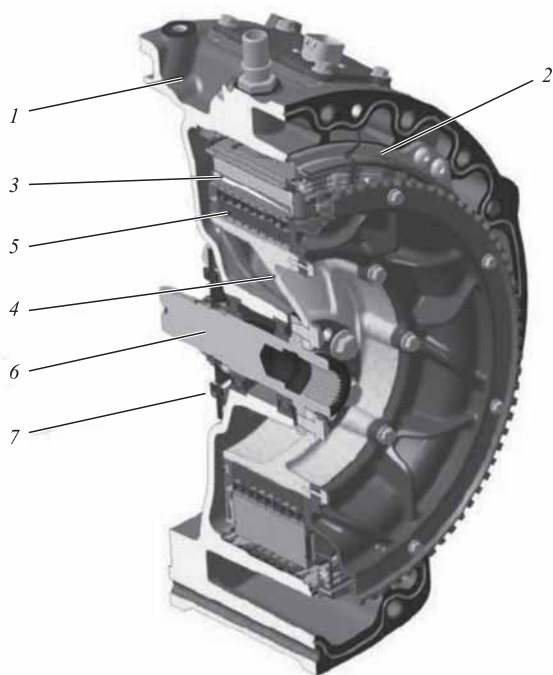


Рис. 5. Выбросы HC в окружающую среду

Параметрами, по которым проводится оптимизация работы гибридной силовой установки, является КПД электромашины и инвертора, величина потребляемого и генерируемого тока электромашины и диапазон питающего напряжения, временная задержка реализации запрашиваемого момента.

На рис. 7 представлена характеристика КПД электромотора и инвертора в зависимости от частоты вращения ротора электромашины и эффективного момента на валу, которые были получены на испытательном стенде, она используется для определения параметров суммарного крутящего момента и механической мощности гибридной силовой установки.

# КОНСТРУКЦИЯ



**Рис. 6. Устройство электромашин:**

1 — корпус электромашин, 2 — корпус статора электромашин, 3 — статор с обмотками, 4 — ступица ротора электромашин, 5 — электромагнитная часть ротора, 6 — вал электромашин, 7 — датчик положения ротора типа резольвер

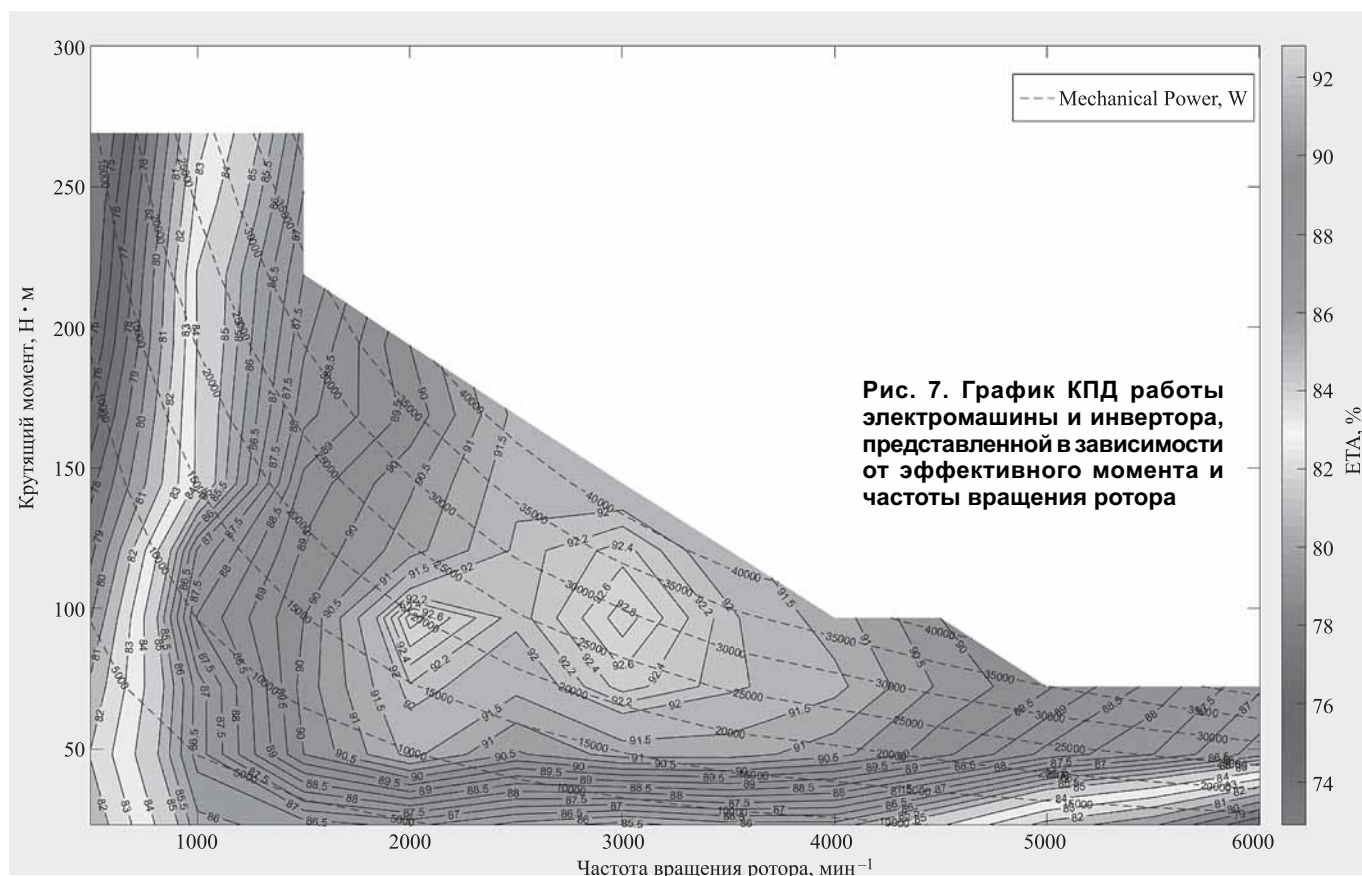
Использование электромашин в гибридной силовой установке обусловлено тем, что эффективность электромашин составляет более 90 % почти во всем диапазоне скоростей вращения и заданных крутящих моментов.

*Инвертор* — это силовой двунаправленный AC/DC преобразователь тока и напряжения, предназначенный для управления электромашинной в генераторном и двигательном режиме. Ошибка регулирования при поддержании заданного крутящего момента инвертором составляет не более  $\pm 2\%$  во всем диапазоне скоростей вращения ротора электромашин.

Важными параметрами инвертора и критериями эффективности его работы являются:

- несущая частота опорного напряжения ШИМ модулятора;
- емкость сглаживающего высоковольтного фильтра в цепи постоянного тока;
- величина омических потерь в IGBT транзисторах при переключении.

*Высоковольтная аккумуляторная батарея* — это литий-ионная аккумуляторная батарея, которая входит в состав гибридной силовой установки, и используется в электрических и транспортных



**Рис. 7. График КПД работы электромашин и инвертора, представленной в зависимости от эффективного момента и частоты вращения ротора**

средствах с гибридными силовыми установками из-за малого тока саморазряда, высокой плотности энергии и удельной емкости. Особенности зарядно-разрядной характеристики литий-ионных батарей и широкий температурный диапазон их применения делают их основными перезаряжаемыми электрическими источниками энергии для гибридного и электрического типа транспортных средств (рис. 8).

Для силовой установки гибридного транспортного средства высоковольтная аккумуляторная батарея подбирается исходя из мощности инвертора и электромашин, а также компромисса между массой высоковольтной батареи и емкостью. Важными параметрами, влияющими на ресурс высоковольтной аккумуляторной батареи, является средний уровень заряда, ток, протекающий через аккумуляторную батарею, количество циклов заряда/разряда, а также температура использования и длительность воздействия нагрузки при низких температурах.

*DC/DC преобразователь* — понижающий преобразователь электрической энергии, выполняющий ее преобразование из высокого постоянного напряжения в низкое постоянное и обратно (реверсивный преобразователь). DC/DC предназначен для питания бортовой сети с номинальным напряжением 12 В и подключенными потребителями, а также демпфирования пусковых токов электромашин за счет энергии низковольтного аккумулятора с номинальным напряжением 12 В. Питание DC/DC преобразователя обеспечивается за счет электросети высокого напряжения, но также в режиме реверса за счет 12 В сети.

Ключевыми характеристиками DC/DC преобразователя являются:

- несущая частота опорного напряжения ШИМ модулятора;

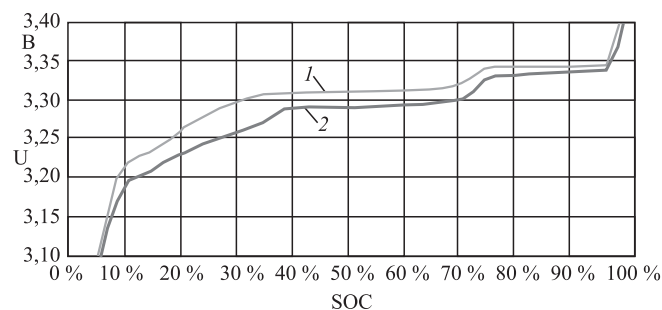


Рис. 8. График зарядной и разрядной характеристики ячейки  $\text{LiFePO}_4$  током 10 А:

1 — заряд, 2 — разряд

- емкость сглаживающего высоковольтного фильтра;
- величина омических потерь в IGBT транзисторах при переключении;
- плотность мощности DC/DC преобразователя.

## 2. Концепция математических имитационных моделей гибридной силовой установки

Математическая имитационная MATLAB Simulink модель гибридной силовой установки состоит из нескольких подмоделей:

1. Многопараметрическая модель реального времени, имитирующая работу ДВС, которая включает в себя модель наполнения цилиндра топливоздушную смесь, модель дроссельной заслонки, модель турбокомпрессора, системы охлаждения, системы изменения фаз газораспределения и другие элементы модели и функции.

2. Имитационная модель инвертора и электромашин. Модель инвертора имитирует работу силового каскада IGBT транзисторов и процессы, протекающие в них. Модель параметризуется с использованием переменных, таких как время переключения, полярность, и сопротивлений переключателей и обратных диодов. Для каждого переключателя могут быть параметризованы условия ошибки "открыт" или "закрит". Также можно смоделировать так называемое свободное вращение электромашин, когда все шесть ключей находятся в открытом состоянии. Зависящее от температуры рассеивание мощности омических компонентов учитывается для всего инвертора. Входная цепь инвертора включает в себя внутреннее сопротивление высоковольтной батареи и емкость высоковольтного фильтра и шины постоянного тока. Таким образом, напряжение шины постоянного тока также может быть смоделировано с достаточной точностью. К модели инвертора и электромашин предъявляются особые требования по точности и величине шага вычисления модели. Это связано с тем, что частота ШИМ силовых IGBT транзисторов равна 16 кГц и для правильного расчета физических процессов, протекающих в инверторе и электромашине, требуется высокая скорость вычислений. Для имитационного математического моделирования используется ПЛИС, которая позволяет вычислять модель инвертора и электромашин с шагом 850 нс.



3. Имитационная модель высоковольтной аккумуляторной батареи. Программная часть содержит модель ячеек батареи, модель нагрузки и температуры, модель изоляции, модель контроллера VCU (Vehicle Control Unit), а также модель отказов систем и компонентов. Эмуляция программной части модели выполняется в (аппаратно-программном комплексе) АПК LABCAR. Модель разработана с помощью приложения MATLAB Simulink и скомпилирована посредством приложения Labcar Operator.

Модель высоковольтной батареи состоит из нескольких подмоделей.

*Модель машины состояний*, которая необходима для определения режима включения/выключения батареи и включения предварительного заряда электрической цепи от блока управления батареями. В модели реализована машина состояний с тремя режимами работы батареи: спящий режим, предварительный заряд (емкости инвертора и силовых проводов) и рабочий режим (заряд/разряд). Сигнал к смене режима работы поступает непосредственно с контакторов, которыми управляет система управления батареями BMS. Модель также включает в себя резистор предварительного заряда и емкость проводов и инвертора.

*Модель ячейки батареи*. Эквивалентная модель ячеек получена на основе экспериментальных данных. Это эмпирическая математическая модель, построенная с помощью базовой библиотеки MATLAB Simulink. Входными сигналами модели являются сила тока и начальный заряд SOC (State Of Charge) каждого модуля. Начальный SOC задается пользователем перед началом эксперимента. Набор выходных сигналов состоит из текущего SOC каждого модуля и мгновенного напряжения каждого модуля и батареи в целом. Дальнейшее развитие модели батареи предусматривает моделирование температуры ячеек в зависимости от нагрузки, температуры охлаждающей жидкости, окружающей среды и прочих факторов.

*Модель расчета заряда*. В рабочем режиме модель вычисляет текущее напряжение и заряд батареи на основе расхода электроэнергии в ампер-часах.

$$Q_{\text{акк}}(t) = \int_0^t I_m(\tau) d\tau,$$

где  $I_m$  — ток, который способен отдать аккумулятор за время  $t$ .

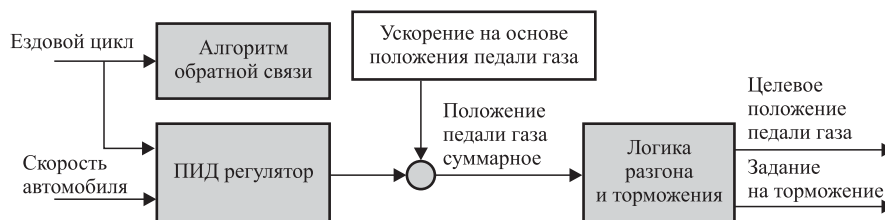


Рис. 9. Структурная схема эмпирической модели водителя

Заряд ячейки в этом случае будет вычисляться по формуле

$$SOC = 1 - Q_{\text{акк}}/C_{\text{акк}},$$

где  $C_{\text{акк}}$  — номинальная емкость аккумулятора в ампер-часах.

4. Имитационная модель водителя представляет собой эмпирическую зависимость управляющих воздействий пользователя на движение автомобиля по ездовому циклу и формирование управляющих сигналов для системы управления гибридом, которые эквивалентны действиям водителя. Ездовой цикл описывается скоростью и характером движения автомобиля, который, в свою очередь, пересчитывается в запрос водителя, представленный в виде запроса момента через педаль акселератора и запроса желаемого замедления для торможения (рис. 9).

5. Модель транспортного средства и окружающей среды. Выходные сигналы из модели водителя используются как входные в модели автомобиля, которая включает в себя модель силовой установки, трансмиссии и колеса (рис. 10).

В модели транспортного средства учитываются характеристики, влияющие на движение (аэродинамическое сопротивление, сопротивление качению колеса, уклон и др.) и пересчитываются в требуемые выходные и входные величины, скорость и ускорение автомобиля, дорожный уклон, массу автомобиля.

### 3. Параметризация математических и имитационных моделей ДВС, электромашины и высоковольтной батареи с использованием экспериментальных данных, полученных на испытательных стендах, для обеспечения точности воспроизведения характеристик реального объекта

Наполнение эмпирических зависимостей, используемых в составе имитационных и математических моделей, происходит за счет численных

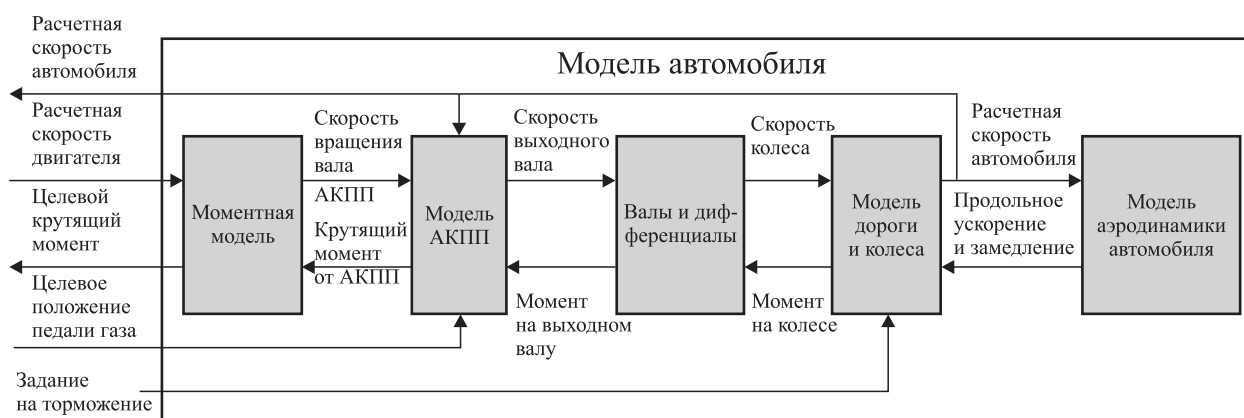


Рис. 10. Модель транспортного средства



Рис. 11. Физическая модель датчиков и исполнительных механизмов

данных, полученных с реальных объектов на испытательных стендах, поэтому ошибка модели по отношению к реальному объекту может не превышать 5%. Чем точнее модель, тем меньше погрешности при переносе результатов работы с имитационной модели на реальный объект. Выходные и входные значения сигналов имитационной модели используются для связи с входными и выходными сигналами компонентов ЭБУ через реализуемую физическую модель датчиков и исполнительных механизмов (рис. 11).

1. Модель ДВС состоит из нескольких связанных между собой подмоделей (модель впускного трубопровода, модель наполнения цилиндра, модель турбокомпрессора, модель выпускной системы и др.). Параметризация модели ДВС заключается в определении характеристик отдельных подмоделей. Это позволяет сделать общую модель ДВС наиболее полной и универсальной. Параметризация выполняется в нескольких направлениях:

- функциональная параметризация ДВС (количество цилиндров, количество клапанов, тип и количество турбокомпрессоров и других элементов);
- параметризация систем и компонентов на основе технических спецификаций и описаний (геометрические размеры дроссельной заслонки, объем камеры сгорания, степень сжатия и другие параметры);

трические размеры дроссельной заслонки, объем камеры сгорания, степень сжатия и другие параметры);

- параметризация на основе данных с испытательного моторного стенда ДВС (эффективность двигателя в зависимости от угла и длительности впрыска).

2. Модель инвертора и электромашины также состоит из нескольких подмоделей (модель силового каскада ключей IGBT, модель, имитирующая электрические и электромагнитные процессы в электромашине, модель, имитирующая механические характеристики электромашины).

Параметризация модели также выполняется в нескольких направлениях:

- функциональная параметризация системы (количество пар полюсов электромашины, тип датчика положения ротора);
- параметризация систем и компонентов на основе технических спецификаций и описаний (активное сопротивление диода в ключах IGBT, время переключения ключей IGBT и других характеристик);
- параметризация на основе данных с испытательного нагрузочного стенда электромашины и инвертора (зависимости сопротивлений  $R_d$

и  $Rq$  и индуктивностей  $Ld$  и  $Lq$  от температуры электромашин).

3. Модель высоковольтной аккумуляторной батареи состоит из подмоделей машины состояний, модели ячейки, модели расчета заряда.

Параметризация выполняется в нескольких направлениях:

- функциональная параметризация системы (количество ячеек, тип датчика тока, химический состав ячеек аккумуляторной батареи);

- параметризация систем и компонентов на основе технических спецификаций и описаний (характеристика датчика тока, контакторов);

- параметризация на основе экспериментальных данных, полученных на испытательном стенде высоковольтной батареи (зависимости внутреннего сопротивления ячеек от температуры и уровня заряда, характеристика падения напряжения при разном уровне заряда и величине тока).

4. Модель транспортного средства и окружающей среды.

Параметризация выполняется следующим образом:

- функциональная параметризация системы (тип привода — передний, задний, полный; тип КП и количество передач);

- параметризация систем и компонентов на основе технических спецификаций и описаний (радиус качения колеса, передаточные отношения для передач КП, дифференциалов, масса автомобиля);

- параметризация на основе опытных данных об испытании автомобиля (момент инерции, аэродинамическое сопротивление).

5. Модель водителя.

Параметризуется регулятор, выполняющий роль водителя, на основе имитаций ездовых

циклов, модели транспортного средства и окружающей среды, включающей в себя модель гибридной силовой установки (модель ДВС, модель инвертора и электромашин, модель высоковольтной батареи).

#### 4. Особенности создания физической модели объекта управления для электронных систем управления ДВС, инвертора и высоковольтной батареи, содержащих алгоритмы управления этими компонентами

Физическая модель объекта представляется совокупностью сигналов датчиков и обратных связей исполнительных механизмов (см. рис. 11). Связь имитационной модели с ЭБУ осуществляется с использованием HIL платформы ETAS. Наличие связи позволяет учесть особенности логики работы ЭБУ с конкретным объектом и провести исследование по оптимизации работы гибридной силовой установки, максимально приближенное к реальному.

Каждый из компонентов описывается с учетом своих особенностей и представляется в последующем на физическом уровне, в частности физическая модель ДВС должна иметь набор инструментов для моделирования сигналов датчиков, используя сигналы ШИМ, аналоговый сигнал, цифровой сигнал и др. Предъявляются высокие требования к реализации подобной модели ввиду необходимости минимизировать задержки и уменьшения ошибки каждого сигнала. Модель считается достоверной при наименьшей ошибке по каждому из сигналов.

Физическая модель инвертора и электромашин выполнена на так называемом сигнальном уровне (рис. 12) и не включает в себя инструмента для моделирования реальных токов и напряже-

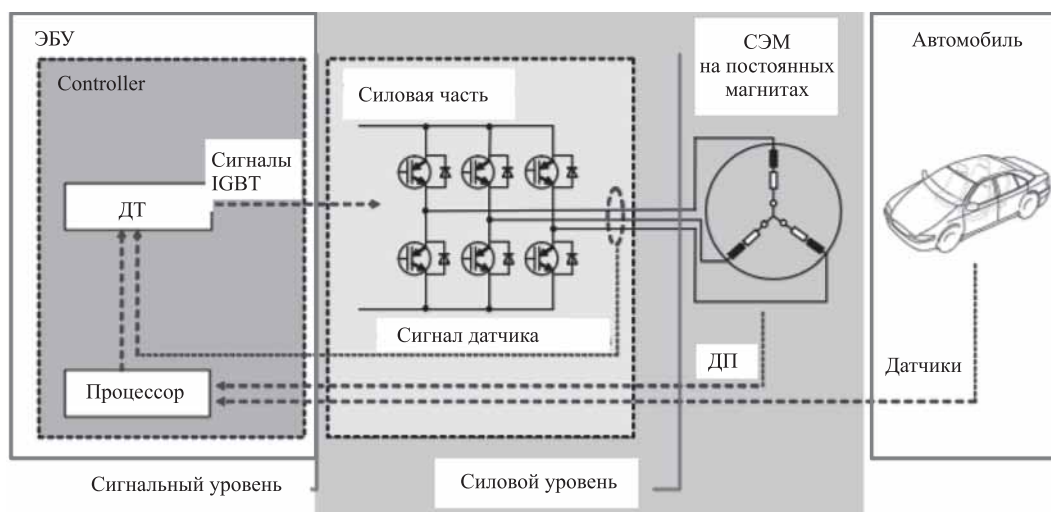


Рис. 12. Физическая модель инвертора и электромашин

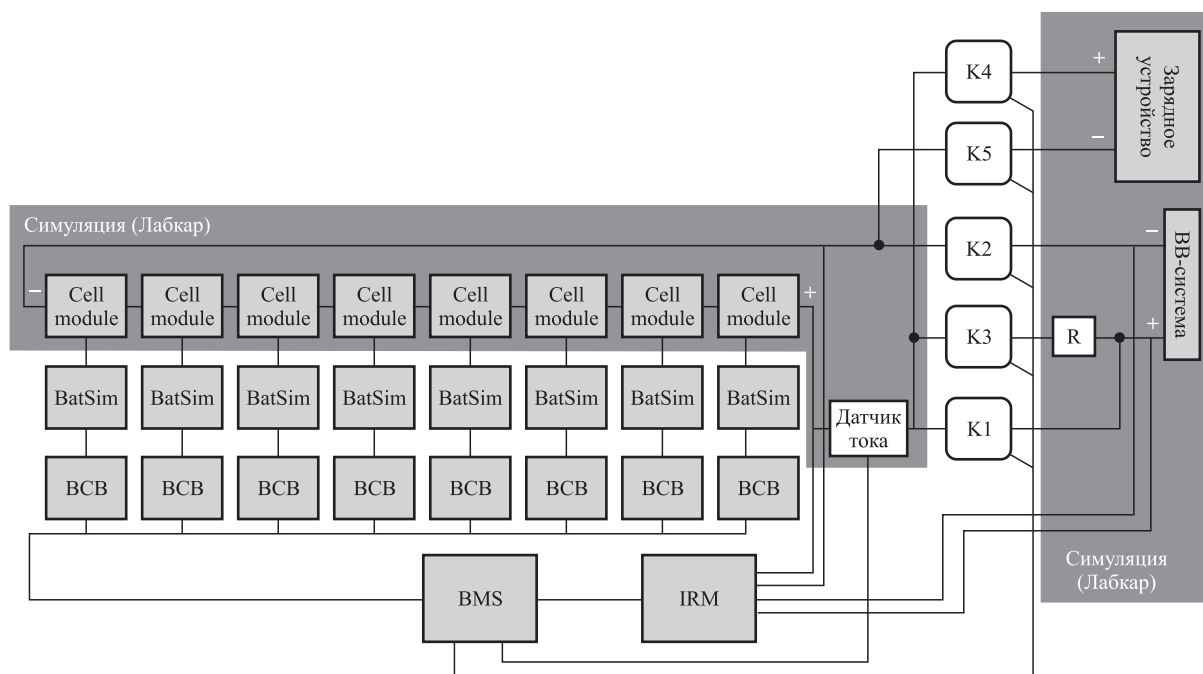


Рис. 13. Физическая модель высоковольтной батареи

ний электромашин, поэтому моделируются сигналы управления транзисторами IGBT, которые используются для расчета крутящего момента и других характеристик электромашин в составе гибридной установки. Физическая модель реализуется на HIL платформе ETAS.

При реализации модели электромашин требуется воспроизвести сигнал датчика положения электромашин (резольвера) и датчиков тока, воспроизводить сигналы управления транзисторами IGBT. Так как процессы, протекающие на IGBT транзисторах и в электромашине, высокочастотны (до 100 кГц), для работы модели используется FPGA контроллер с шагом модели в 850 нс.

Физическая модель высоковольтной батареи (рис. 13) должна воспроизводить напряжение на каждой из 96 аккумуляторных ячеек. Это связано с тем, чтобы обеспечить работу блока контроля батареи (БКБ), входящего в состав ЭБУ высоковольтной батареи, и контролировать напряжение каждой ячейки.

## Основные результаты работы и выводы

Применение комплекса имитационного и физического моделирования решило задачу поиска и выбора оптимального режима работы гибридной силовой установки в различных условиях без проведения натурных экспериментов на реаль-

ном объекте и позволяет найти или опровергнуть концепцию всей системы на более раннем этапе, сэкономить средства на разработку компонентов системы, ЭБУ и алгоритмов управления.

В ходе разработки комплекса имитационных и физических моделей компонентов был использован способ разработки от более простых моделей к более сложным, что позволило создать гибкую модульную структуру модели гибридной силовой установки и позволило изменять или дополнять модель в процессе разработки всей системы, когда некоторые компоненты были недоступны и заменялись имитационными моделями. Для быстрого изменения состава системы в аппаратно-программном комплексе без изменения всей модели были предусмотрены унифицированные интерфейсы и взаимосвязи между моделями компонентов.

При оптимизации гибридной силовой установки необходимо реализовать такой режим работы ДВС, когда он максимальное количество времени работает в наиболее эффективной зоне (минимальный расход топлива, максимальный эффективный КПД) и выключен в режимах, когда ДВС наименее эффективен (движение с малой скоростью, холостой ход, малые нагрузки), соответственно электромашин смещает рабочую точку ДВС в наиболее эффективную зону или полностью берет на себя роль двигателя, приводящего транспортное средство в движение.

Оптимизация работы ДВС и электромашин должна быть выполнена одновременно с оптимизацией карт переключения передач КП.

При разработке и реализации комплекса имитационных и физических моделей объектов требуется использование эмпирических данных полученных при испытаниях реальных объектов для создания, калибровки и проверки моделей. Это необходимо для того, чтобы добиться максимальной сходимости модели к реальному объекту. Для получения достоверных результатов оптимизации гибридной силовой установки по модели целевая сходимость и точность модели к реальному объекту должна быть не менее 95 % во всех исследуемых режимах.

Проверку имитационных и физических моделей необходимо выполнить по данным, полученным с испытаний компонента, по параметрам, входящим в модель. Проверку всего комплекса имитационных и физических моделей гибридной силовой установки и транспортного средства необходимо выполнить по данным полученным при испытаниях реального транспортного средства, на роликовом стенде, при этом испытания должны быть проведены до оптимизации и после оптимизации режимов работы гибридной силовой установки для подтверждения достоверности модели и результатов работы.

*Работа подготовлена при поддержке гранта Президента РФ НШ-2515.2020.8*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Development** of an Engine-in-the-loop Vehicle Simulation System in Engine Dynamometer Test Cell Shugang Jiang, Michael H. Smith and James Kitchen A&D Technology Inc. Atsushi Ogawa A&D Co. Ltd. 2009 SAE International.
2. **On emission** certification of heavy-duty hybrid electric vehicles using hardware-in-the-loop simulation Jonas Fredriksson and Esteban Gelso Chalmers University of Technology.
3. **Real-Time** Models of Hybrid Electric Vehicle Powertrains Stefan Geng and Thomas Schulte Ostwestfalen-Lippe University of Applied Sciences Department of Electrical Engineering and Computer Science Lemgo, Germany.
4. **Modeling**, Optimization and Hardware-in-Loop Simulation of Hybrid Electric Vehicles, Department of Electrical and Computer Engineering University of Manitoba Winnipeg, Manitoba December 2012.
5. **Modeling** and Simulation of Electric and Hybrid Vehicles, By David Wenzhong Gao, Senior Member IEEE, Chris Mi, Senior Member IEEE, and Ali Emadi, Senior Member IEEE.
6. **A Reconfigurable** Vehicle Powertrain HIL Testing Facility Ashok Nedungadi & Karl Kreder Southwest Research Institute Advanced Vehicle Technologies Section San Antonio, TX USA.
7. **Энергоустановки** автомобильного транспорта с тяговым электроприводом. Монография / Л. Ю. Лежнев, Н. А. Хрипач, Ф. А. Шустров и др.
8. **Технология** обеспечения зарядного баланса автомобильной низковольтной аккумуляторной батареи в системах управления автомобиля с комбинированной энергоустановкой / В. В. Дебелов, Д. В. Ендачев, Д. М. Якунов, О. И. Деев / В сборнике: Технологии и компоненты интеллектуальных транспортных систем. — 2018. — С. 710—732.
9. **Моделирование** энергоемких накопителей автомобильной комбинированной энергоустановки / В. Н. Козловский, В. И. Строганов, В. В. Дебелов, С. В. Петровский. Грузовик. — 2018. — № 11. — С. 13—14.
10. **Якунов Д. М., Дебелов В. В., Ендачев Д. В.** Энергоэффективность электрических и гибридных транспортных средств в условиях низких отрицательных температур / В сборнике: Интеллектуальные транспортные системы. Сборник трудов Международного автомобильного научного форума МАНФ-2017. — 2017. — С. 270—278.
11. **Комплекс** электронных систем управления движением легкового автомобиля с комбинированной силовой установкой. Часть 1 / В. Н. Козловский, В. И. Строганов, В. В. Дебелов, М. А. Пьянов. Электротехнические и информационные комплексы и системы. — 2014. — Т. 10. — № 1. — С. 40—49.
12. **Комплекс** электронных систем управления движением легкового автомобиля с комбинированной силовой установкой. Часть 2 / В. Н. Козловский, В. И. Строганов, В. В. Дебелов, М. А. Пьянов. Электротехнические и информационные комплексы и системы. — 2014. — Т. 10. — № 2. — С. 19—28.

В. С. Антипенко, д-р техн. наук, профессор, e-mail: antipenkovs7@mail.ru, РУТ (МИИТ), г. Москва,  
С. А. Лебедев, канд. техн. наук, доцент, РВВДКУ им. В. Ф. Маргелова, г. Рязань

## КОМБИНИРОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА В СИСТЕМЕ ПУСКА ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

*При пуске дизеля грузовика системой электростартерного пуска с комбинированным источником тока создаются более благоприятные условия для работы дизеля: за счет увеличения углового ускорения коленчатого вала уменьшается время его работы в условиях полусухого трения, а за счет сокращения времени пуска уменьшается количество несгоревшего топлива, скапливающегося в цилиндрах в начальный момент времени. Все это повышает надежность работы дизеля и снижает непроизводительные затраты топлива, уменьшает выброс вредных веществ в атмосферу. Использование накопителя энергии в дополнение к аккумуляторной батарее позволило не только уменьшить емкость аккумуляторных батарей в 2 раза, но и снизить токовые нагрузки на них при стартерных режимах разряда, что увеличивает ресурс батарей-модулей и приближает его к ресурсу накопителей энергии, а также гарантировать запуск двигателя в зимнее время (особенно в Заполярье).*

**Ключевые слова:** молекулярный накопитель энергии, комбинированный источник тока, режим пуска дизеля, напряжение, амплитуда тока стартера, частота вращения, остаточная емкость, внутреннее сопротивление.

*When starting the diesel truck's system, starting with a combined current source creates more favorable conditions for the operation of the diesel engine: due to the increase in angular acceleration of the crankshaft is reduced while working in conditions of dry friction, and by reducing start-up time reduces the quantity of unburned fuel accumulating in the cylinders at the initial moment of time. All this increases the reliability of the diesel engine and reduces unproductive fuel costs, reduces the emission of harmful substances into the atmosphere. The use of an energy storage device in addition to the battery allowed not only to reduce the capacity of batteries by 2 times, but also to reduce the current loads on them during starter discharge modes, which increases the resource of battery modules and brings it closer to the resource of energy storage devices, as well as to guarantee engine start in winter (especially in the Arctic).*

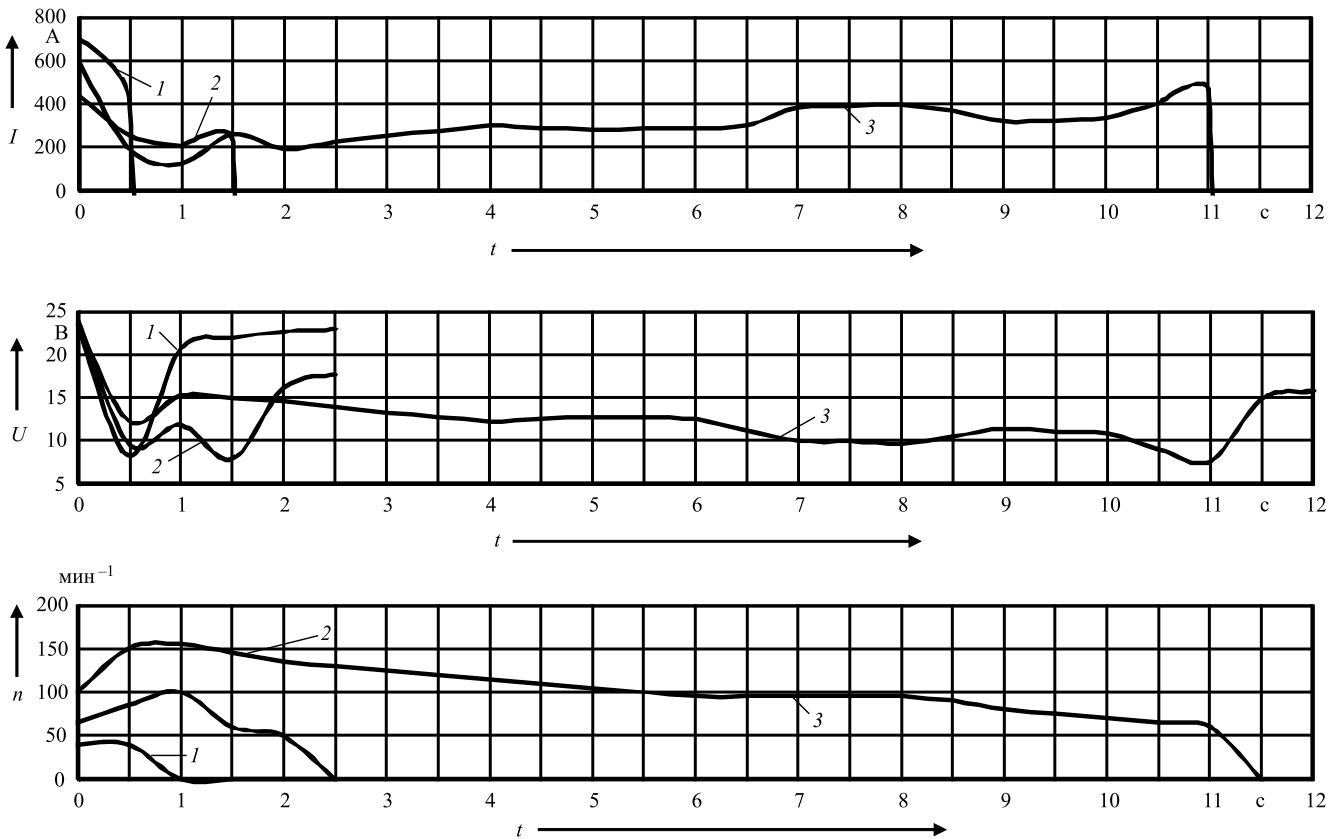
**Keyword:** molecular energy storage, combined current source, diesel start mode, voltage, starter current amplitude, speed, residual capacity, internal resistance.

### Экспериментальные исследования режимов проворачивания коленчатого вала дизеля КАМАЗ-740.310 с использованием различных источников тока

Серия испытаний комбинированного источника тока (КИТ) системы электростартерного пуска (СЭП) была произведена с молекулярным накопителем энергии (МНЭ). Натурные испытания СЭП с альтернативными источниками тока проводились на автомобилях КАМАЗ-740 с дизелями ЯМЗ-238М2-32 и с накопителями МНЭ-120/28 на дизеле. Наибольший эффект применения молекулярного накопителя энергии был получен при испытаниях с почти полностью разряженными штатными аккумуляторными батареями. Остаточная емкость испытываемых батарей 6СТ-190А составляла менее 20 %, а значение внутреннего сопротивления  $r_{AB}$  было равно 5,14 мОм.

Опыты показали, что осуществить пуск дизеля КАМАЗ-740.310 при таких параметрах аккумуляторных батарей невозможно [1–3]. Продолжительность работы системы пуска составила всего 0,5 с, при этом напряжение батарей упало до значения  $U_{AB} = 8,23$  В, а стартер смог провернуть коленчатый вал всего на 0,33 оборота (график 1, рис. 1).

При подключении к указанным аккумуляторным батареям (АБ) молекулярного накопителя энергии МНЭ-120/28 система электростартерного пуска смогла проработать в течение 11 с (график 3, рис. 1). Коленчатый вал дизеля достиг частоты вращения  $n = 100$  мин<sup>-1</sup> на 0,1 с, а максимальное значение частоты вращения коленчатого вала на первой секунде составило  $n = 155$  мин<sup>-1</sup>. Пусковая частота вращения коленчатого вала поддерживалась в течение 10 с. Амплитудное значение силы тока стартера составило 580 А. Напряжение ком-



**Рис. 1. Проворачивание коленчатого вала дизеля КАМАЗ-740.310 от различных источников тока ( $U_3 = 23,38$  В):**  
 1 – 6СТ-190А 2 шт.; 2 – МНЭ-120/28; 3 – 6СТ-190А 2 шт. и МНЭ-210/28

бинированного источника тока с  $U_{\text{КИТ}} = 23,38$  В снизилось на 11 с до значения 7,65 В.

Для того чтобы определить роль накопителя энергии были выполнены проворачивания коленчатого вала непосредственно от МНЭ, заряженного от разряженных штатных аккумуляторных батарей. Так как напряжение накопителя энергии составило  $U_{\text{НЭ}} = 23,38$  В, то и продолжительность прокрутки была незначительная? менее 2 с (график 2, рис. 1). Коленчатый вал дизеля достиг максимальной частоты вращения  $n = 100 \text{ мин}^{-1}$  на 1 с. Напряжение накопителя энергии с  $U_{\text{НЭ}} = 23,38$  В упало на 1,63 с до значения 7,87 В. Максимальное амплитудное значение силы тока стартера составило 386 А. Это указывает на то, что в опыте с комбинированным источником тока в начальный момент 4/5 токовой нагрузки взял на себя накопитель энергии, разгрузив аккумуляторные батареи.

Результаты испытаний показывают, что при проворачивании коленчатого вала дизеля системой электростартерного пуска с комбинированным источником тока качественно изменяется

характер нагрузок в цепях системы [3, 4]. В начальный момент процесса проворачивания коленчатого вала, когда для преодоления статического момента сопротивления дизеля необходимо создание максимального момента стартером, его питание, в основном, осуществляется от молекулярного накопителя энергии. Ток нагрузки аккумуляторных батарей возрастает более плавно, чем при проворачивании коленчатого вала штатной системой и при этом в начальный момент проворачивания максимальный ток на 30–70 % меньше (в зависимости от состояния АБ и степени заряженности накопителя энергии).

Увеличение значения электрического тока в обмотках стартера на 40–75 % в начальный момент времени при работе системы пуска с комбинированным источником тока обеспечивает при насыщенной магнитной системе стартера пропорциональное увеличение вращающего момента, приложенного к коленчатому валу дизеля. В результате этого в первые 1–2 с угловое ускорение коленчатого вала на 20–30 % выше, чем при использовании штатных АБ. При этом устойчи-

вые вспышки в цилиндрах дизеля начинают возникать при частоте вращения коленчатого вала 45—55 мин<sup>-1</sup>, тогда как при пуске дизеля штатной системой — при частоте вращения коленчатого вала — 60—85 мин<sup>-1</sup>.

Очевидно, что частота вращения и ускорение коленчатого вала влияют на создание условий для самовоспламенения топлива в цилиндрах дизеля. При пуске дизеля с большим угловым ускорением, имеющим место при работе системы с комбинированным источником тока, параметры топливовоздушной смеси достигают требуемых для самовоспламенения значений при меньшей частоте вращения и за более короткое время с момента начала пуска дизеля. Время пуска дизеля при этом сокращается на 35—200 % — в зависимости от параметров АБ, по сравнению со временем пуска штатной системой. Кроме того, на 15—90 % уменьшается время повышения давления масла в системе смазки дизеля, что позволяет сократить время работы движущихся деталей в условиях полусухого трения.

Таким образом, при пуске дизеля системой электростартерного пуска с комбинированным источником тока создаются более благоприятные условия для работы дизеля: за счет увеличения углового ускорения коленчатого вала уменьшается время его работы в условиях полусухого трения, а за счет сокращения времени пуска уменьшается количество несгоревшего топлива, скапливающегося в цилиндрах в начальный момент времени. Все это повышает надежность работы дизеля и снижает непроизводительные затраты топлива.

Применение для пуска дизеля комбинированного источника тока положительным образом

сказывается и на работе АБ: уменьшается разряд АБ при совершении одного пуска, при этом также снижается максимальное значение силы тока нагрузки АБ, что повышает надежность и долговечность АБ.

## **Натурные испытания систем электростартерного пуска автомобилей Урал-4320-0010-31 с комбинированными источниками тока**

С целью проверки эффективности применения модульных комбинированных источников тока КИТ наряду с лабораторными исследованиями были проведены натурные испытания систем электростартерного пуска с различными источниками энергии на специальной автомобильной технике (САТ) (рис. 2).

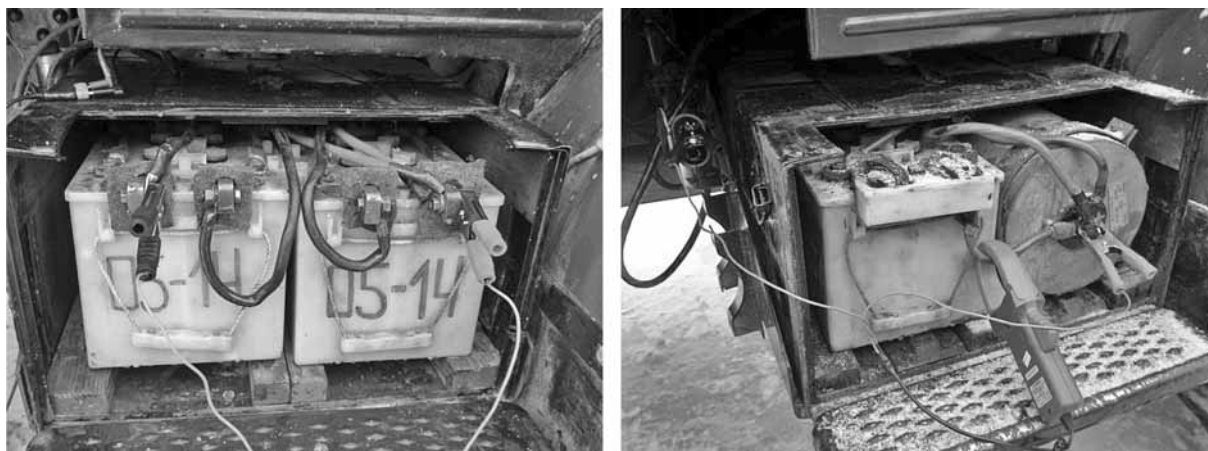
Модульный принцип построения источника тока с использованием батарей-модулей 6ТСТС-100А становится оптимальным решением задачи создания комбинированного источника тока для объектов САТ (рис. 3) с соблюдением жестких требований к габаритно-присоединительным размерам [4]. Он позволяет снизить емкость аккумуляторных батарей, их массу и объем.

Достоинства молекулярных накопителей энергии (малое внутреннее сопротивление и высокая удельная мощность) дают возможность использовать их в системах пуска в качестве промежуточных источников энергии, размещая их между батареями и стартером. Выделение энергии накопителями за короткий промежуток времени позволяет развивать электростартеру значительную мощность, вращать коленчатый вал с большой пусковой частотой и тем самым повысить на-



Рис. 2. Проведение натурных испытаний систем электростартерного пуска с КИТ на специальной автомобильной технике





**Рис. 3. Размещение модульного и модульного комбинированного источников тока в штатных аккумуляторных отсеках**

дежность пуска двигателей внутреннего сгорания (ДВС). А так как АБ разряжается на накопитель энергии в течение длительного по сравнению с продолжительностью процесса пуска ДВС времени, то ее емкость можно значительно уменьшить.

К преимуществам накопителей энергии в СЭП можно также отнести большой срок службы (несколько десятков тысяч часов). Они не требуют обслуживания, нетоксичны, условия пуска ДВС менее зависимы от состояния батарей и др. [4–6].

Однако все сказанное о достоинствах системы пуска с модульными комбинированными источниками тока — лишь качественная ее оценка. Для получения полной картины были проведены сравнительные испытания трех систем электростартерного пуска с различными источниками энергии.

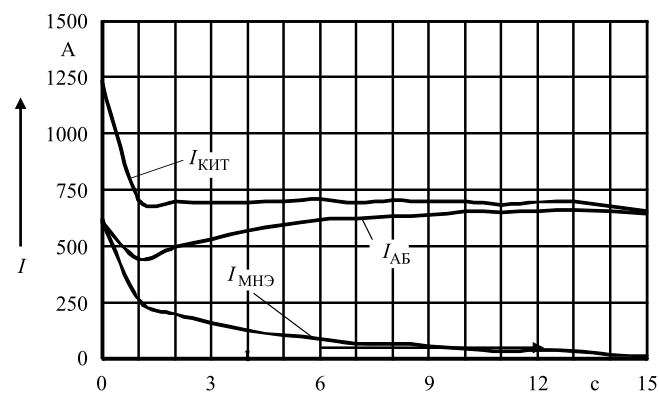
Натурные испытания СЭП с альтернативными источниками тока проводились на автомобилях Урал-4320-0010-31 с дизелями ЯМЗ-238М2-32 мощностью 151 кВт при температуре окружающего воздуха минус 10–12 °С [3, 4]. Один автомобиль был оснащен штатными аккумуляторными батареями 6СТ-190А. Второй — модульным источником тока, включающим четыре батареи-модуля 6ТСТС-100А. На третьем автомобиле была смонтирована разработанная система пуска с комбинированным источником тока, включающим две батареи-модуля 6ТСТС-100А и накопитель энергии МНЭ-210/28 (ЗАО "НПО "ТехноКор", г. Москва).

Наибольший интерес представляло исследование работы комбинированного источника тока [4–6]. На его работоспособность в целом оказывало влияние множество факторов:

- емкости аккумуляторных батарей и молекулярного накопителя энергии, как номинальные, так и фактические;

- степень заряженности аккумуляторных батарей и напряжение, до которого заряжается накопитель энергии перед пуском двигателя;
- срок службы и наработка, особенно аккумуляторных батарей;
- температура окружающей среды и т. д.

На рис. 4 представлен график изменения силы стартерного тока при проворачивании коленчатого вала двигателя в течение 15 с от комбинированного источника тока. Пиковая нагрузка ложится на источник тока в течение первых 0,02–0,5 с. Как видно из графика, накопитель энергии в первые две секунды снижает нагрузку АБ в 1,5–2 раза. Следует отметить, что пуски двигателя осуществлялись в течение 0,5–1,5 с. Все АБ перед испытаниями были протестированы и показали 100 %-ную заряженность. Проведенные ранее испытания показали, что наибольший эффект достигается при использовании накопителя



**Рис. 4. Изменение силы тока комбинированного источника тока при проворачивании коленчатого вала дизеля ЯМЗ-238М2-32**

энергии, когда АБ разряжены и самостоятельно произвести пуск не могут.

Эффективность использования накопителей энергии зависит от напряжения, до которого он заряжен. В рассматриваемой системе электростартерного пуска с комбинированным источником тока, смонтированной на автомобиле Урал-4320-0010-31, накопитель энергии заряжается от АБ, поэтому напряжение на его клеммах равно напряжению батарей 24,5 В.

Чтобы сравнить, на сколько можно повысить эффективность накопителя энергии, было выполнено три пуска двигателя только от накопителя МНЭ-210/28, заряженного до напряжений 24 В, 28 В и 30 В. То есть с имитацией трех возможных вариантов заряда накопителя энергии: от аккумуляторных батарей (24 В), от генераторной установки (28 В) и при использовании дополнительного преобразователя напряжения или внешнего зарядного устройства (30 В).

На рис. 5 показаны графики изменения силы тока МНЭ-210/28 при пуске двигателя. Как видно, максимальную "помощь" АБ может оказать накопитель энергии, заряженный до 30 В: пуск двигателя осуществляется за 0,62 с, а коленчатый вал вращается со средней частотой 83 мин<sup>-1</sup>. Для сравнения: при заряде накопителя энергии до 24 В пиковое значение силы тока меньше на 300 А, время пуска двигателя — 1,26 с, а средняя частота вращения коленчатого вала — 53 мин<sup>-1</sup>.

Таким образом, для повышения эффективности использования накопителей энергии не обязательно увеличивать их емкость. Достаточно повысить напряжение заряда.

Этот вывод очень интересен с практической точки зрения. Он означает, что для ДВС, находящихся на хранении с приведенными в рабочее состояние АБ, или ДВС малоинтенсивной экс-

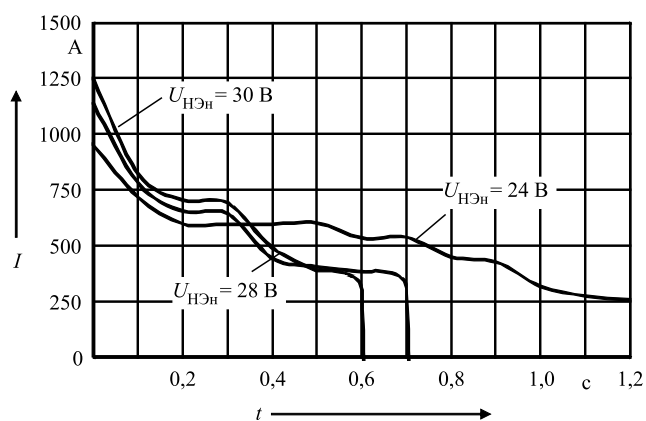


Рис. 5. Изменение силы тока МНЭ-210/28 при пуске двигателя ЯМЗ-238М2-32

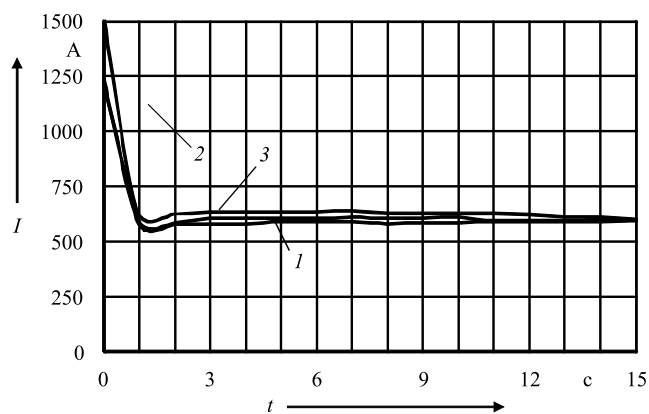


Рис. 6. Изменение силы стартерного тока при проворачивании коленчатого вала дизеля ЯМЗ-238М2-32 от различных источников тока:

1 — 6СТ-190А 2 шт.; 2 — 6ТСТС-100А 4 шт.; 3 — 6ТСТС-100А 2 шт. и МНЭ-210/28

плуатации, когда батареи могут оказаться разряженными до 50 % и ниже, накопитель энергии решает проблему ее готовности к эксплуатации.

Так, если сравнить графики изменения силы стартерного тока (рис. 6), напряжения (рис. 7) и частоты вращения коленчатого вала дизеля ЯМЗ-238М2-32 (рис. 8) при его проворачивании, то видно: максимальный силы ток (1500 А) в начальный момент проворачивания наблюдается в случае использования модульного источника (6ТСТС-100А), что объясняется высокими электрическими характеристиками батареи-модуля. В случае же двух других источников он равен 1200 А.

Однако, если вернуться к рис. 4 и оценить работу батарей-модулей в составе комбинированного

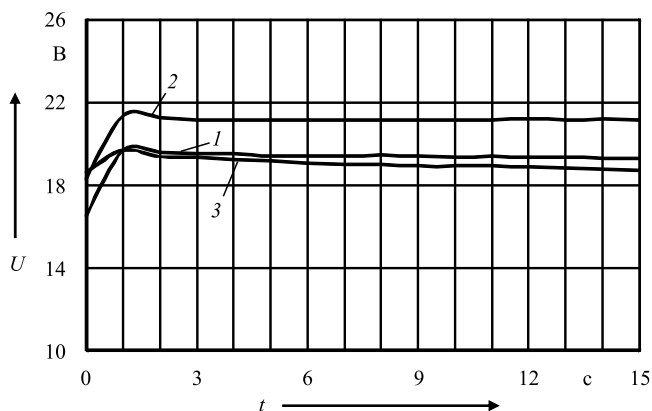
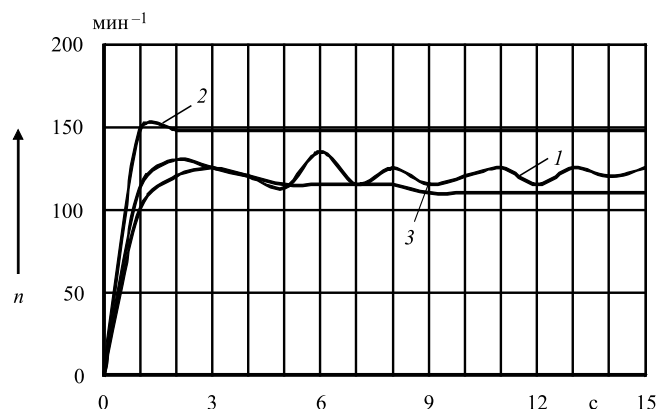


Рис. 7. Изменение напряжения при проворачивании коленчатого вала дизеля ЯМЗ-238М2-32 от различных источников тока:

1 — 6СТ-190А 2 шт.; 2 — 6ТСТС-100А 4 шт.; 3 — 6ТСТС-100А 2 шт. и МНЭ-210/28



**Рис. 8.** Изменение частоты вращения при проворачивании коленчатого вала дизеля ЯМЗ-238М2-32 от различных источников тока:

1 — 6СТ-190А 2 шт.; 2 — 6ТСТС-100А 4 шт.; 3 — 6ТСТС-100А 2 шт. и МНЭ-210/28

источника тока, то легко заметить, что батареи-модули в этот начальный момент отдают всего лишь 600 А (половину токовой нагрузки). Таким образом, использование накопителя энергии позволило не только уменьшить емкость аккумуляторных батарей в 2 раза, но и снизить токовые нагрузки на них при стартерных режимах разряда, что должно увеличить ресурс батарей-модулей и приблизить его к ресурсу накопителей энергии.

Не менее интересны с практической точки зрения и результаты сравнения комбинированного источника тока со штатными АБ (6СТ-190А) и модульным источником тока (6ТСТС-100А).

Благодаря тому что в начальный момент проворачивания коленчатого вала двигателя ток батарей-модулей в комбинированном источнике тока ниже, то и падение напряжения на них незначительное — до 18,61 В, тогда как у штатных батарей оно снижается до 16,54 В, у модульного источника — до 18,31 В (см. рис. 7). Благодаря этому повышается надежность срабатывания элементов систем электрооборудования, особенно критичных к перепадам напряжения. Однако при более длительном проворачивании коленчатого вала напряжение комбинированного источника тока постепенно снижается — сказывается меньшая суммарная емкость батарей.

Графики изменения частоты вращения коленчатого вала (см. рис. 8) показывают достаточно высокие значения, обеспечивающие надежный пуск дизеля ЯМЗ-238М2-32. Следует особо отметить равномерность и высокое значение — 150 мин<sup>-1</sup>, частоты вращения при проворачивании коленчатого вала от модульного источника тока.

Испытания показали, что все три источника тока (аккумуляторные батареи 6СТ-190А, мо-

дульные батареи 6ТСТС-100А и комбинированный источник тока, состоящий из 6ТСТС-100А и МНЭ-210/28) соответствуют требованиям ОСТ 37.001.052 и ОСТ 37.001.066 [3, 4]. Но применять их на объектах ВАТ следует в зависимости от условий эксплуатации: для техники малоинтенсивной эксплуатации или находящейся на дежурстве целесообразно использовать модульные комбинированные источники тока; в тяжелых условиях эксплуатации, в районах с низкими температурами — модульный и комбинированный источники тока; в районах с умеренным климатом — аккумуляторные батареи 6СТ-190А. Однако для обеспечения унификации в перспективе необходим переход на батареи-модули 6ТСТС-100А и комбинированные источники тока.

Собранные и полученные материалы по применению накопителей энергии (НЭ) в системах электростартерного пуска двигателей специальной автомобильной техники показали, что НЭ позволяют не только обеспечить пуск двигателей, но и в определенных условиях получить по сравнению с существующими СЭП ряд преимуществ, в частности, снизить емкость аккумуляторных батарей, их размеры, массу и объем [4—6]. СЭП с накопителями энергии могут обеспечить пуск ДВС при значительной степени разряженности АБ, что повышает эксплуатационную надежность образца специальной техники, особенно в условиях низких температур. При отсутствии стартерного режима разряда аккумуляторных батарей СЭП с накопителем энергии может обеспечить пуск двигателя от батареи сравнительно небольшой емкости. В этом случае появляется возможность применения модульных АБ (создание модульных комбинированных источников тока) или применения щелочных необслуживаемых никель-кадмиевых аккумуляторных батарей, имеющих сравнительно большой срок службы (1000—3000 циклов разряда-заряда) и работоспособных без разогрева при температуре до -50 °С.

В зависимости от назначения двигателя объектов САТ можно объединить в три группы по степени использования комбинированных источников тока. К первой группе относятся стационарные двигатели, в СЭП которых возможно полное исключение АБ. Вторая группа включает двигатели с ограниченным количеством потребляемой электрической энергии, что позволяет уменьшить номинальную емкость АБ. К третьей группе отнесены двигатели, на которых емкость АБ подобрана не из условия обеспечения пуска двигателя, а из условия сохранения заданного

баланса электроэнергии, что требует дополнительной проверки энергобаланса.

Процесс пуска двигателя с использованием накопителя энергии носит импульсный характер с продолжительностью прокрутки 1–3 с, что недостаточно для выполнения требований ОСТ 37.001.052. Иначе говоря, надежный пуск двигателя гарантируется за большее время, чем время работы СЭП с накопителем энергии. Но здесь следует заметить, что при использовании накопителей энергии проворачивание коленчатого вала двигателя происходит в начальный момент более интенсивно, т. е. с большей частотой, чем при проворачивании от АБ. В результате двигателя, как правило, пускались за более короткое время, чем указано в стандарте. Поэтому требуются специальные исследования пусковых качеств ДВС при использовании накопителей энергии в СЭП с целью уточнения стандарта.

Опыт эксплуатации и проведенные испытания дизельных двигателей внутреннего сгорания в различных климатических условиях и поддержание их в готовности к применению позволили определить ряд требований к системам электростартерного пуска двигателей с комбинированными источниками тока:

1) сохранение аккумулирующих свойств и надежности систем пуска в широком диапазоне рабочих температур (от  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ );

2) автономность работы автомобильной техники, т. е. отсутствие необходимости в восстановлении аккумулирующих свойств систем электростартерного пуска с помощью не находящихся на ней устройств;

4) автоматический пуск двигателя, т. е. пуск двигателя должен осуществляться дистанционно с рабочего места водителя; после пуска должно быть предусмотрено автоматическое отключение стартера и автоматическое отключение накопителя энергии от бортовой сети; в системе автоматически должна быть предусмотрена защита от включения стартера при работающем двигателе; должна быть предусмотрена сигнализация о степени заряженности накопителей энергии;

5) простота и надежность конструкции, обеспечивающие минимальные затраты времени на обслуживание в эксплуатации;

6) ресурс системы пуска должен быть не менее ресурса соответствующих образцов военной техники;

7) невысокая металлоемкость и габариты системы электростартерного пуска, а также, по возможности, снижение, или вовсе исключение из конструкции дефицитных материалов;

8) согласованность динамических свойств системы электростартерного пуска с конструктивными особенностями двигателя и условиями работы его систем при пуске;

9) изготовление элементов системы электростартерного пуска и источников тока из отечественных материалов;

Испытания объектов САТ позволили определить ряд рекомендаций по использованию комбинированных источников тока в системах электростартерного пуска:

1) в качестве вспомогательного источника электрической энергии в модульных комбинированных источниках тока необходимо использовать емкостные молекулярные накопители энергии (конденсаторы с двойным электрическим слоем), обладающие наибольшей удельной мощностью;

2) номинальное напряжение накопителей энергии должно быть равно номинальному напряжению СЭП. Это позволит использовать накопители энергии не только на серийно выпускаемых и проектируемых двигателях, но и на уже находящихся в эксплуатации;

3) в целях снижения потерь энергии в стартерных проводах накопитель энергии следует размещать как можно ближе к стартеру. Это возможно, поскольку накопители энергии вибростойки, взрыво-пожаробезопасны, нетоксичны, не нуждаются в техническом обслуживании в течение всего срока службы и не предъявляют специальных требований по их установке;

4) для более эффективной работы системы электростартерного пуска накопители энергии и аккумуляторные батареи в момент пуска двигателя должны быть включены параллельно. Частота проворачивания коленчатого вала двигателя и продолжительность пуска при такой схеме включения источников тока выше, чем при раздельном их использовании;

5) при использовании накопителей энергии первого поколения (с ограниченным временем нахождения под напряжением) они должны подключаться к аккумуляторным батареям непосредственно перед пуском двигателя. Для этого в минусовой ветви накопителя энергии должен быть предусмотрен контактор, позволяющий автоматически отключать накопитель после пуска двигателя;

6) при использовании накопителей энергии второго поколения (с неограниченным временем нахождения под напряжением) установившийся ток утечки в цепи накопителя и аккумуляторной батареи не должен превышать тока саморазряда батареи.

Экономический эффект от применения комбинированных источников тока возрастет при снижении стоимости накопителей энергии. При этом следует учитывать эффект от повышения надежности пуска двигателей системой с комбинированным источником тока, а также снижение числа неплановых ремонтов из-за неисправностей батарей.

Кроме того, следует учитывать и снижение затрат на поддержание экологической обстановки за счет уменьшения количества вредных веществ, входящих в состав аккумуляторных батарей и попадающих при их утилизации и ремонте в окружающую среду. Нетрудно представить, что количество отходов от применения батарей-модулей в составе модульного источника тока может уменьшиться в 2 раза, а в составе комбинированного источника тока в 2,5 раза по сравнению со штатными аккумуляторными батареями.

Другие виды технико-экономической эффективности, неподдающиеся расчету и оцениваемые экспертным методом:

1) экономится топливо в связи с повышением надежности пуска при отрицательных температурах окружающей среды;

2) снижается предельная температура пуска двигателя в холодных климатических условиях, т. е. повышается эффективность его использования;

3) уменьшаются расходы на эксплуатацию с учетом повышения долговечности и надежности системы пуска двигателя;

4) снижается расход электроэнергии для подзарядки аккумуляторных батарей.

Таким образом, применение молекулярных накопителей энергии для грузовых автомобилей с дизельными двигателями внутреннего сгорания целесообразно как для новых автомобилей, так и для автомобилей, уже находящихся в эксплуатации.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Дасоян М. А.** Современная теория свинцового аккумулятора / М. А. Дасоян, И. А. Агуф. — Л.: Энергия, 1975. — 312 с.
2. **Чижков Ю. П.** Электрооборудование автомобилей и тракторов / Ю. П. Чижков. — М.: Машиностроение, 2007. — 655 с.
3. **Кочуров А. А.** Исследование процесса протекающей токообразующей электрохимической реакции в свинцово-кислотном аккумуляторе с целью улучшения характеристик его работы / А. А. Кочуров, С. А. Лебедев, В. С. Абанин [и др.]. — Рязань, РВВДКУ, 2015. — 194 с.
4. **Лебедев С. А.** Комбинированный источник тока для систем электростартерного пуска двигателей военной автомобильной техники / С. А. Лебедев. — Рязань: РВАИ, 2010. — 235 с.
5. **Антипенко В. С.** Альтернативные источники тока для систем электростартерного пуска / В. С. Антипенко, С. А. Лебедев. — "Автомобильная промышленность". — 2009. — № 11. — С. 9—11.
6. **Антипенко В. С.** Тестирование систем электростартерного пуска / В. С. Антипенко, С. А. Лебедев, С. В. Антипенко. — "Грузовик". — 2011. — № 1. — С. 22—26.

---

---

## Автобус YUTONG\_ZK6128H



Компания "Ютонг-Центр Столица", эксклюзивный поставщик нового туристического автобуса Yutong ZK 6128 H, ввезла в Россию первую партию обновленных лайнеров. Данная модель была продемонстрирована дилером в прошлом году на выставке Comtrans-2019. Транспорт прошел предпродажную подготовку и готов к отгрузке. На конец августа 2020 г. компания "Ютонг-Центр Столица" является эксклюзивным поставщиком Yutong ZK 6128 H на территории РФ. Туристический Yutong ZK 6128 H — симбиоз Yutong T 122 и Yutong ZK 6122 H9. Именно последняя модель послужила технической базой новинки. Завод Yutong оставил все узлы и агрегаты, а также шасси от полюбившегося российским перевозчиком Yutong ZK 6122 H9, и облачил его в кузов люксовой модели — Yutong T 122. Автобусы из первой партии оснащены двигателями Weichai WP 10.375E53 мощностью 369 л. с. и с максимальным крутящим моментом 1650 Нм. Компании "Ютонг-Центр Столица" удалось сохранить привлекательную для бизнеса стоимость нового туристического автобуса. Цена на Yutong ZK 6128 H в базовой комплектации будет сопоставима с "туристами" предыдущего поколения.

*Пресс-релиз компании "Ютонг-Центр Столица"*

**В. П. Тарасик**, д-р техн. наук, профессор, e-mail: avtobru@gmail.com, Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Беларусь

## ОЦЕНКА УПРАВЛЯЕМОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ АВТОМОБИЛЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ НА ВИРАЖЕ

*Предложена математическая модель и разработана на ее основе методика компьютерной имитации движения автомобиля на вираже. На примере грузового автомобиля категории  $N_3$  проведено исследование управляемости и устойчивости и приведены полученные графики, иллюстрирующие изменение характеристик управляемого движения. Определены критические режимы движения, обуславливающие отрыв колес от поверхности дороги и боковое скольжение. При заданной кривизне траектории определена предельная скорость управляемого движения.*

**Ключевые слова:** автомобиль, колесо, поперечная и продольная реакции дороги, сила инерции, инерционный момент, траектория движения автомобиля, углы увода колес, угол крена подрессоренной массы, боковое скольжение, занос автомобиля.

*The paper presents the mathematical model and the technique of computer imitation of a vehicle movement on bend. Research of roadability and stability of the truck and the schedules illustrating change of characteristics of the steered movement have been obtained. The critical modes of the movement causing separation of wheels from road surface and side slippage have been defined. Speed limit of the steered movement on trajectory of the set curvature have been determined.*

**Keywords:** vehicle, wheel, cross and longitudinal reactions of the road, inertia force, inertial moment, trajectory of a vehicle movement, angles of withdrawal of wheels, spring weight angle of heel, side slippage, vehicle drift.

При движении автомобиля по криволинейному участку дороги на него кроме силы тяжести и реакций внешней среды действуют центробежная сила инерции и инерционный момент, оказывающие существенное влияние на перераспределение нормальных реакций на колеса, что приводит к возникновению поперечных реакций и боковому уводу колес. При определенных сочетаниях радиуса кривизны траектории движения, скорости автомобиля и состояния поверхности дороги могут возникать боковые скольжения и отрывы колес от опорной поверхности. Вследствие этого существует опасность потери управляемости и устойчивости движения автомобиля.

На автомобильных дорогах высшей категории для обеспечения высокой скорости движения криволинейные участки дороги — виражи выполняют с большими значениями радиусов и соответствующими поперечными уклонами дороги. Радиусы виражей на таких дорогах находятся в пределах 1000—2000 м, но не менее 500 м. На дорогах же IV—V категорий они могут снижаться до 40—60 м [1].

При проектировании автомобиля необходим обоснованный выбор параметров механизмов

и систем, оказывающих непосредственное влияние на управляемость и устойчивость криволинейного движения. К таким системам относятся прежде всего подвеска автомобиля и рулевое управление. Существенное влияние также оказывают параметры компоновки — координаты центра масс, колеи передних и задних мостов, рессорные базы, соотношения подрессоренной и неподрессоренной масс и др.

Для исследования управляемости и устойчивости автомобиля необходим обоснованный выбор динамической модели, позволяющей определить нормальные и поперечные реакции всех колес, углы увода колес, выявить режимы движения, при которых возможно боковое опрокидывание или занос мостов, определить предельную скорость управляемого движения на вираже.

### Цель исследования

Обоснование и выбор динамической модели автомобиля, построение математической модели и определение параметров управляемого и устойчивого движения при заданных параметрах криволинейной траектории.

## Методика исследования

Рассмотрим решение поставленной задачи на примере двухосного грузового автомобиля. Для учета влияния отмеченного множества компонентов автомобиля и их параметров на процесс движения и управления необходима динамическая модель с соответствующим числом степеней свободы, которая позволила бы адекватно оценить результат взаимодействия автомобиля с внешней средой.

С этой целью автомобиль необходимо представить в виде многомерной динамической системы, состоящей из трех взаимодействующих подсистем: подрессоренной массы и двух неподдресоренных масс — переднего и заднего мостов. Взаимодействие их осуществляется посредством упругих и диссипативных элементов подвески.

На рис. 1, а–в приведена динамическая модель, позволяющая решить поставленную задачу [2].

Под действием силы инерции  $\vec{F}_{jn}$ , приложенной в центре  $C$  подрессоренной массы, изменяется нагрузка на упругие элементы левой и правой подвесок и происходит наклон подрессоренной массы относительно неподдресоренных масс на угол крена  $\lambda_{кр}$  относительно некоторой оси, называемой осью крена. В поперечной плоскости подрессоренной массы ось крена проходит через точку  $N$ , а в плоскостях неподдресоренных масс —

через точки  $N_1$  и  $N_2$  соответственно (см. рис. 1, б и в). Длина перпендикуляра  $h_\lambda$ , опущенного из центра подрессоренной массы  $C$  на ось крена, называется плечом крена.

В результате подрессоренная масса  $m_p$  находится в динамическом равновесии под действием следующей системы сил и моментов: силы тяжести подрессоренной массы  $m_p \vec{g}$ ; силы инерции  $\vec{F}_{jn} = -m_p \vec{a}_y$ ; инерционного момента  $\vec{M}_{j\lambda} = -J_{пл} \ddot{\lambda}_{кр}$ ; суммарных вертикальной  $\vec{F}_{hz}$  и боковой  $\vec{F}_{ny}$  реакций неподдресоренных масс  $m_{n1}$ ,  $m_{n2}$  и суммарного реактивного момента упругих элементов подвески  $\vec{M}_p$ . Значение реактивного момента определяется из выражения

$$M_p = M_{p1} + M_{p2} = (c_{\lambda 1} + c_{\lambda 2}) \lambda_{кр}, \quad (1)$$

где  $c_{\lambda 1}$ ,  $c_{\lambda 2}$  — коэффициенты угловой жесткости передней и задней подвесок, определяемые по формуле

$$c_{\lambda i} = 0,5 c_{pi} \eta_p B_{pi}^2; \quad (2)$$

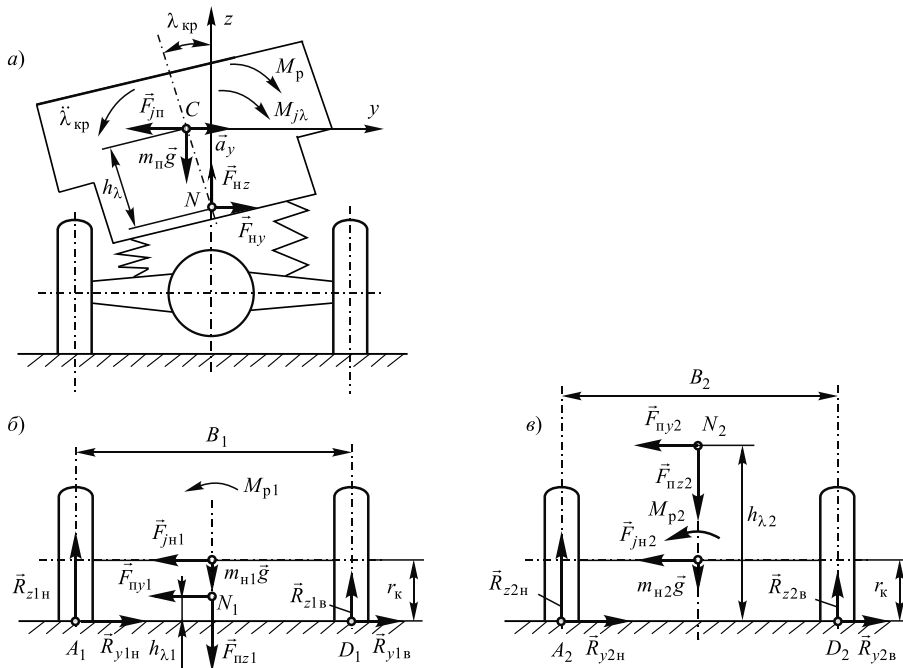
$c_{pi}$  — коэффициент жесткости упругого элемента подвески  $i$ -го моста при вертикальной деформации;  $B_{pi}$  — расстояние между упругими элементами (рессорная база);  $\eta_p$  — коэффициент, учитывающий увеличение жесткости упругого элемента при его скручивании в поперечной плоскости автомобиля ( $\eta_p = 1,05 \dots 1,25$ ).

На неподдресоренную массу переднего моста действуют: сила ее тяжести  $m_{n1} \vec{g}$  и сила инерции  $\vec{F}_{jn1} = -m_{n1} \vec{a}_y$ ; реакции подрессоренной массы  $\vec{F}_{ny1}$  и  $\vec{F}_{nz1}$ ; нормальные  $\vec{R}_{z1n}$ ,  $\vec{R}_{z1b}$  и поперечные реакции  $\vec{R}_{y1n}$ ,  $\vec{R}_{y1b}$ ; реактивный момент упругих элементов подвески моста  $\vec{M}_{p1}$ .

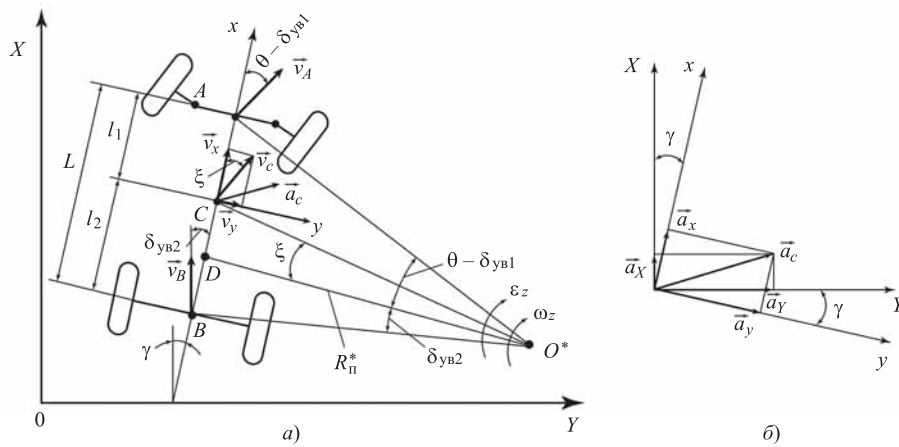
Аналогичная система сил действует на неподдресоренную массу заднего моста (см. рис. 1, в).

На рис. 2, а представлена схема кинематических параметров движения автомобиля в плоскости дороги на повороте.

Выберем две системы координат — подвижную  $xOz$ , связанную с автомобилем, и неподвижную  $XOY$  на опорной поверхности дороги. Начало подвижной системы координат расположено в центре масс автомобиля  $C$ , ось  $x$  направлена вдоль продольной оси автомобиля  $AB$ , ось  $y$  — в боковом направлении в сторо-



**Рис. 1.** Динамическая модель для исследования управляемости и устойчивости криволинейного движения автомобиля



**Рис. 2.** Схема к определению скоростей и ускорений при криволинейном движении автомобиля

ну мгновенного центра поворота  $O^*$ , а ось  $z$  — перпендикулярна к плоскости  $xCy$  (рис. 2, а).

Углы поворота обоих управляемых колес  $\theta$  приняты одинаковыми, так как их значения при выполнении исследуемого маневра сравнительно невелики (в пределах 4—8 град.). Углы увода передних и задних колес обозначены соответственно  $\delta_{yв1}$  и  $\delta_{yв2}$ . Скорость центра масс  $\vec{v}_c$ , а ее проекции на оси  $x$  и  $y$  — соответственно  $\vec{v}_x$  и  $\vec{v}_y$ . Ускорение центра масс  $\vec{a}_c$ , угловая скорость вращения корпуса автомобиля относительно вертикальной оси  $\vec{\omega}_z$ , а угловое ускорение  $\vec{\varepsilon}_z$ . Курсовой угол  $\gamma$  характеризует изменение положения продольной оси автомобиля  $Sx$  относительно неподвижной оси  $OX$ . Взаимосвязи между векторами ускорений  $\vec{a}_x, \vec{a}_y$  в подвижной системе координат и в неподвижной  $\vec{a}_X, \vec{a}_Y$  отображены на рис. 2, б.

На основе учета системы сил, действующих на выделенные компоненты динамической модели, составлена система дифференциальных уравнений движения автомобиля на выраже [3]:

где  $m_a$  — масса автомобиля;  $\delta_{п.м}$  — коэффициент приведенной массы, учитывающий кинетическую энергию относительного движения вращающихся масс автомобиля;  $J_z$  — момент инерции автомобиля относительно вертикальной оси  $z$ ;  $\omega_\theta, \theta$  — угловая скорость и угол поворота колес;  $R_{п}^*$  — радиус поворота автомобиля;  $c_\lambda$  — суммарный коэффициент угловой жесткости подвески:  $c_\lambda = c_{\lambda 1} + c_{\lambda 2}$ ;  $\mu_a$  — суммарный коэффициент демпфирования амортизаторов подвески:  $\mu_a = \mu_{a1} + \mu_{a2}$ ;  $\omega_{кр}, \lambda_{кр}$  — угловая скорость и угол крена поддрессоренной массы;  $J_{п\lambda}$  — момент инерции поддрессоренной массы относительно оси крена:

$$J_{п\lambda} = J_x + m_{п} h_{\lambda}^2; \quad (4)$$

$J_x$  — момент инерции поддрессоренной массы автомобиля относительно продольной оси  $x$ .

При моделировании предполагалось движение автомобиля на выраже с постоянной скоростью  $v_x$ , поэтому первое уравнение системы (3)

$$\left. \begin{aligned} dv_x/dt &= (R_{x1} \cos \theta - R_{x2} - R_{y1} \sin \theta - F_h - F_w) / (\delta_{п.м} m_a) + v_y \omega_z; \\ dv_y/dt &= (-R_{x1} \sin \theta + R_{y1} \cos \theta + R_{y2}) / m_a - v_x \omega_z; \\ d\omega_z/dt &= (-R_{x1} l_1 \sin \theta + R_{y1} l_1 \cos \theta - R_{y2} l_2) / J_z; \\ dX/dt &= v_x \cos \gamma - v_y \sin \gamma; \\ dY/dt &= v_x \sin \gamma + v_y \cos \gamma; \\ d\gamma/dt &= \omega_z; \\ d\theta/dt &= \omega_\theta; \\ d\omega_{кр}/dt &= [m_{п} (R_{п}^* + h_{\lambda} \lambda_{кр}) \omega_z^2 h_{\lambda} + m_{п} g h_{\lambda} \lambda_{кр} - c_{\lambda} \lambda_{кр} - \mu_a \omega_{кр}] / J_{п\lambda}; \\ d\lambda_{кр}/dt &= \omega_{кр}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$



не использовалось. Значениями продольных реакций  $R_{x1}$  и  $R_{x2}$  пренебрегаем (при постоянной скорости криволинейного движения они существенно меньше нормальных и поперечных реакций).

Поперечные реакции  $R_{y1}$  и  $R_{y2}$  определялись из выражений [2]

$$R_{y1} = k_{yB1}\delta_{yB1}; \quad (5)$$

$$R_{y2} = k_{yB2}\delta_{yB2}, \quad (6)$$

где  $k_{yB1}$ ,  $k_{yB2}$  — коэффициенты сопротивления уводу колес соответственно переднего и заднего мостов автомобиля.

Углы увода колес  $\delta_{yB1}$ ,  $\delta_{yB2}$  вычислялись по формулам [2]

$$\delta_{yB1} = \theta - (l_1\omega_z + v_y)/v_x; \quad (7)$$

$$\delta_{yB2} = (l_2\omega_z - v_y)/v_x. \quad (8)$$

Радиус поворота автомобиля на вираже

$$R_{\pi}^* = L / [\operatorname{tg}(\theta - \delta_{yB1}) + \operatorname{tg}\delta_{yB2}]. \quad (9)$$

При моделировании скорость движения на вираже варьировалась в пределах  $v_x = 30 \dots 60$  км/ч. Перед въездом на вираж задавалась начальная скорость поворота управляемых колес  $\omega_{\theta}^*$  в зависимости от скорости движения автомобиля. Радиус осевой линии виража принят равным  $R_{o.l} = 50$  м, ширина опорной поверхности дороги 4 м. При отклонении радиуса поворота автомобиля  $R_{\pi}^*$  от радиуса  $R_{o.l}$  более чем на  $\pm 0,5$  м осуществлялось корректирование траектории движения  $R_{\pi}$  путем дискретного изменения скорости поворота управляемых колес  $\Delta\omega_{\theta}$ .

Значения  $\omega_{\theta}^*$  вычислялись по формуле

$$\omega_{\theta}^* = \frac{\arcsin(L_{н.у}/R_{o.l})}{L_{н.у}} v_x, \quad (10)$$

где  $L_{н.у}$  — длина начального участка въезда, на котором происходит переход от прямолинейного движения к круговому (измеряется вдоль оси  $X$ ).

Алгоритм вычисления значений  $\Delta\omega_{\theta}$  соответствовал выражению

$$\Delta\omega_{\theta} = \begin{cases} \omega_{\theta}^*/k_{\omega} & \text{при } R_{\pi} > (R_{o.l} + 0,5); \\ -\omega_{\theta}^*/k_{\omega} & \text{при } R_{\pi} < (R_{o.l} - 0,5); \\ 0 & \text{при } (R_{o.l} - 0,5) < R_{\pi} < (R_{o.l} + 0,5), \end{cases} \quad (11)$$

где  $k_{\omega}$  — коэффициент, устанавливающий соотношение между  $\Delta\omega_{\theta}$  и  $\omega_{\theta}^*$ , определяющее интенсивность сигналов управления поворотом колес (параметр управляющего воздействия).

## Результаты исследования

В качестве объекта моделирования принят автомобиль МАЗ-5337 (категория  $N_3$ ). Информация о параметрах этого автомобиля использована из [4]: полная масса  $m_a = 15\,000$  кг; подрессоренная масса  $m_{\pi} = 14\,070$  кг; неподрессоренные массы  $m_{н1} = 250$  кг,  $m_{н2} = 680$  кг; моменты инерции  $J_x = 13\,550$  кг·м<sup>2</sup>;  $J_y = J_z = 95\,000$  кг·м<sup>2</sup>; база автомобиля  $L = 475$  м; координаты центра масс  $l_1 = 2,97$  м,  $l_2 = 1,78$  м,  $h_c = 1,5$  м; плечо крена  $h_{кр} = 0,7$  м; колеи  $B_{к1} = 2,05$  м,  $B_{к2} = 1,8$  м; рессорные базы  $B_{p1} = 1,8$  м,  $B_{p2} = 1,7$  м; коэффициенты жесткостей подвесок  $c_{p1} = 150$  кН/м,  $c_{p2} = 350$  кН/м; коэффициенты сопротивления уводу мостов  $k_{yB1} = 150$  кН/рад,  $k_{yB2} = 260$  кН/рад; коэффициенты сопротивления амортизаторов  $\mu_{a1} = 110$  кН·с/м,  $\mu_{a2} = 240$  кН·с/м; статический радиус колес  $r_{ст} = 0,505$  м; коэффициент сцепления  $\phi_x = 0,75$ .

При проведении исследований управляемости и устойчивости необходимо прежде всего определить условия возникновения бокового опрокидывания и скольжения колес.

Опрокидывание произойдет при отрыве внутренних по отношению к центру поворота колес от дороги, т. е. при  $R_{zib} \leq 0$ . Нормальная реакция переднего внутреннего колеса  $R_{z1b}$  (см. рис. 1, б) вычисляется по формуле

$$R_{z1b} = 0,5m_{a1}g - (m_{\pi1}h_{\lambda1}a_{yп} + m_{н1}r_{к1}a_{yн} + c_{\lambda1}\lambda_{кр})/B_{к1}, \quad (12)$$

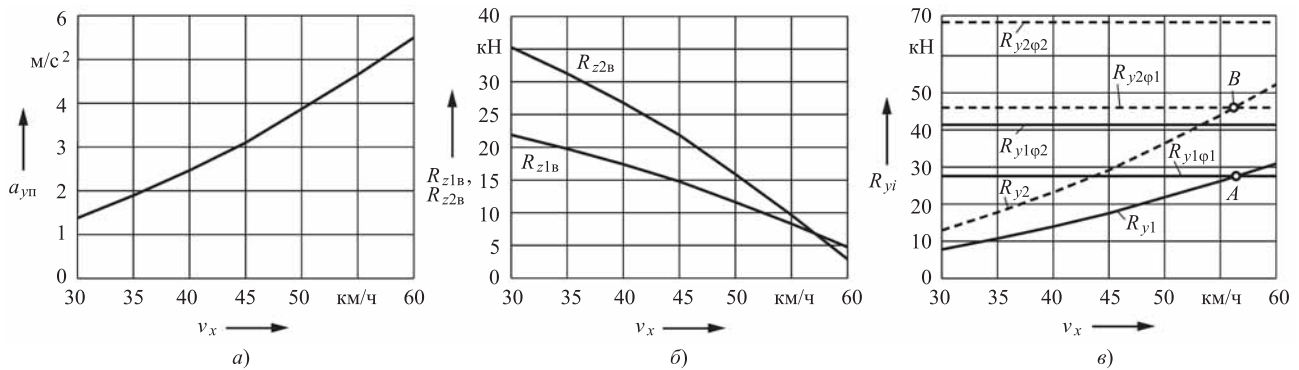
где  $m_{\pi1}$  — часть подрессоренной массы, нагружающей передний мост;  $a_{yп}$ ,  $a_{yн}$  — боковые ускорения соответственно подрессоренной и неподрессоренной масс:

$$a_{yп} = (R_{\pi}^* + h_{\lambda}\lambda_{кр})\omega_z^2; \quad a_{yн} = R_{\pi}^*\omega_z^2. \quad (13)$$

Выражение для вычисления  $R_{z2b}$  (рис. 1, в) аналогично.

При вычислении нормальных реакций наружных по отношению к центру поворота колес  $R_{z1н}$ ,  $R_{z2н}$  в формуле (12) знак "минус" заменяется на "плюс".

На рис. 3, а представлен график зависимости бокового ускорения подрессоренной массы  $a_{yп}$  от



**Рис. 3.** Зависимости бокового ускорения подрессоренной массы (а), нормальных реакций колес (б) и поперечных реакций (е) от скорости движения автомобиля по криволинейной траектории радиусом  $R = 5$  м

скорости автомобиля  $v_x$ , а на рис. 3, б — графики зависимостей нормальных реакций внутренних по отношению к центру поворота передних  $R_{z1B}$  и задних  $R_{z2B}$  колес. Очевидно, что в исследуемом диапазоне скоростей  $v_x$  отрыва колес от поверхности дороги не происходит.

На рис. 3, в показаны графики зависимостей суммарных поперечных реакций передних  $R_{y1}$  и задних  $R_{y2}$  колес от скорости, а также их предельные значения  $R_{y1\phi1}$ ,  $R_{y2\phi1}$ ,  $R_{y1\phi2}$ ,  $R_{y2\phi2}$  при двух величинах коэффициента сцепления  $\phi_1 = 0,5$  и  $\phi_2 = 0,75$ . Боковое скольжение, согласно этим графикам, возможно лишь при  $\phi_1 = 0,5$  и скорости автомобиля  $v_x \geq 56,3$  км/ч (точки А и В).

Графики углов крена подрессоренной массы  $\lambda_{кр}$  и скоростей изменения углов крена  $\omega_{кр}$  показаны на рис. 4, а–в. Значение  $\lambda_{кр}$  при боковом ускорении  $a_{yup} = 4$  м/с<sup>2</sup> не должно превышать 6–7 град. [2]. Как видно из рис. 4, в, при  $v = 50$  км/ч  $\lambda_{кр} = 3$  град, а боковое ускорение при этом составляет  $a_{yup} = 3,86$  м/с<sup>2</sup>.

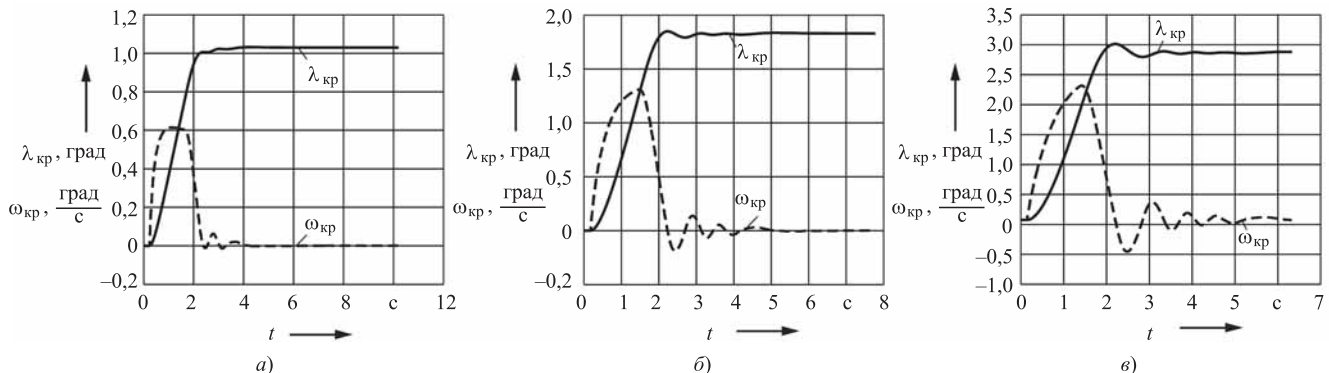
На рис. 5, а–в представлены графики траектории движения  $R_{тр}$  автомобиля при скоростях соответственно 30, 40 и 50 км/ч.

Сравнение полученных результатов показывает, что с увеличением скорости возрастает величина отклонения радиуса траектории  $R_{тр}$  движения автомобиля от осевой линии виража  $R_{о.л.}$ . При скорости  $v_x = 50$  км/ч траектория движения выходит за пределы проезжей части дороги, ограничиваемой радиусами  $R_H$  и  $R_B$ .

На рис. 6, а–в показаны графики изменения во времени дискретных корректирующих сигналов скорости поворота управляемых колес  $\Delta\omega_\theta$  и отображено начальное значение скорости поворота при въезде на вираж  $\omega_\theta^*$ , а на рис. 7, а–в — графики изменения углов поворота колес  $\theta$ .

С увеличением скорости автомобиля количество управляющих воздействий возрастает, скорости поворота колес  $\Delta\omega_\theta$  и амплитуды углов их поворота  $\theta$  увеличиваются. При скорости  $v_x = 50$  км/ч управляющие воздействия на колеса  $\Delta\omega_\theta$  и  $\theta$  не успевают обеспечить ликвидацию отклонения радиуса траектории  $R_{тр}$  от осевой линии виража  $R_{о.л.}$

На рис. 8, а–в представлены графики изменения поперечных реакций  $R_{y1}$  и  $R_{y2}$  во время проезда виража, а на рис. 9, а–в — углов увода мостов автомобиля  $\delta_{yB1}$  и  $\delta_{yB2}$ .



**Рис. 4.** Углы крена  $\lambda_{кр}$  и скорости крена  $\omega_{кр}$  при скоростях движения автомобиля по криволинейной траектории 30 (а), 40 (б) и 50 км/ч (е)

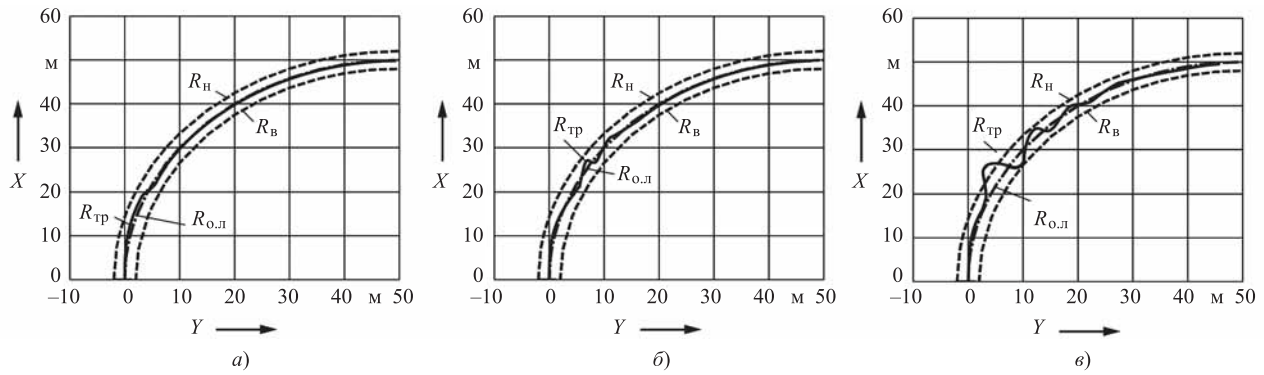


Рис. 5. Графики траектории движения автомобиля  $R_{Т.Р}$  при скоростях 30 (а), 40 (б) и 50 км/ч (в)

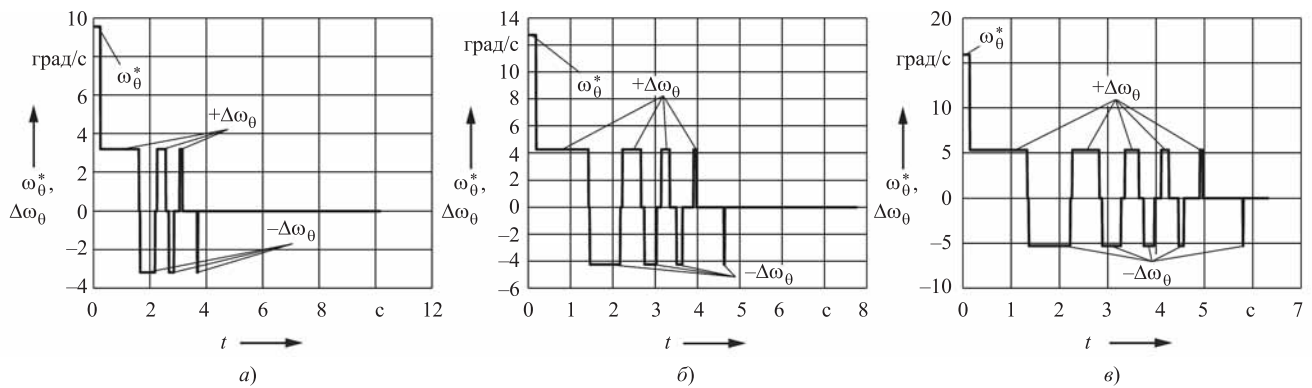


Рис. 6. Графики дискретных корректирующих сигналов скорости поворота управляемых колес  $\Delta\omega_\theta$  и начального значения скорости  $\omega_\theta^*$  при скоростях движения автомобиля 30 (а), 40 (б) и 50 км/ч (в)

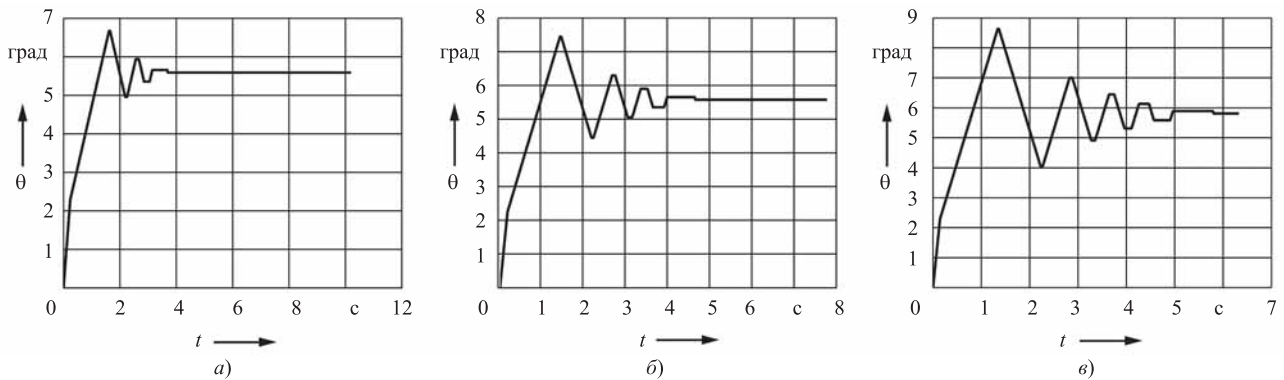
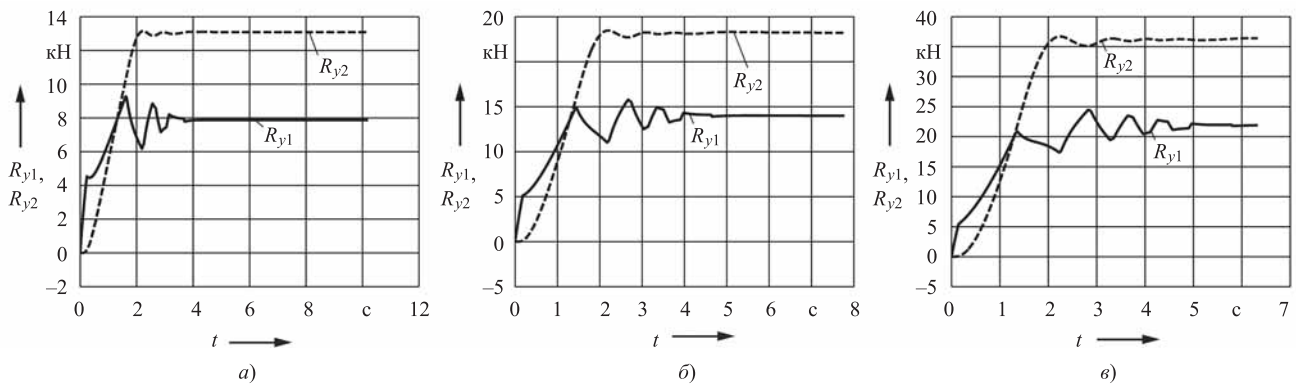


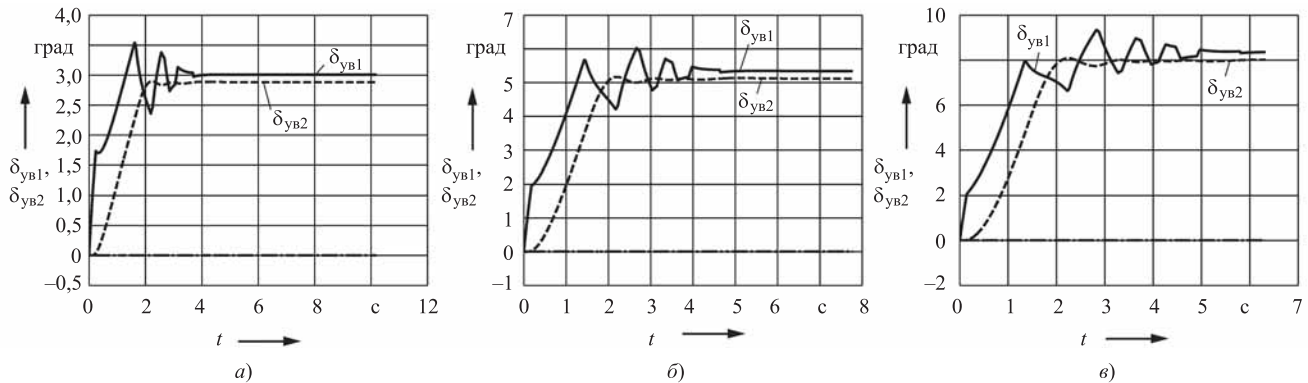
Рис. 7. Изменения угла поворота управляемых колес  $\theta$  при скоростях движения автомобиля 30 (а), 40 (б) и 50 км/ч (в)

У исследуемого автомобиля  $\delta_{\text{ув}2} < \delta_{\text{ув}1}$ , что обусловлено конструктивными параметрами данного автомобиля. Как следует из представленных рисунков, амплитуды колебаний  $R_{y1}$ ,  $R_{y2}$ ,  $\delta_{\text{ув}1}$ ,  $\delta_{\text{ув}2}$  с увеличением скорости движения существенно возрастают, что не способствует достижению устойчивости процесса управления.

Рассмотрим возможные причины ухудшения управляемости с увеличением скорости. Они могут быть обусловлены физическими свойствами динамической системы автомобиля. Свойство автомобиля изменять кривизну траектории движения при изменении скорости называется статической поворачиваемостью. Количественная



**Рис. 8.** Изменения поперечных реакций  $R_{y1}$  и  $R_{y2}$  при скоростях движения автомобиля 30 (а), 40 (б) и 50 км/ч (е)



**Рис. 9.** Изменения углов увода мостов  $\delta_{yb1}$  и  $\delta_{yb2}$  при скоростях движения автомобиля 30 (а), 40 (б) и 50 км/ч (е)

оценка этого свойства — коэффициент статической поворачиваемости  $\eta_{пов}$ , определяемый из соотношения

$$\eta_{пов} = k_{yb1}l_1 / (k_{yb2}l_2). \quad (14)$$

При  $\eta_{пов} < 1$  с увеличением скорости радиус поворота  $R_{п}^*$  возрастает, боковое ускорение снижается, устойчивость управляемого движения повышается. Однако при этом снижается чувствительность автомобиля к управляющему воздействию на поворот колес. Такой автомобиль обладает недостаточной поворачиваемостью. Характерной его особенностью является соотношение  $\delta_{yb2} < \delta_{yb1}$  между углами увода колес, что снижает вероятность заноса заднего моста.

Если  $\eta_{пов} > 1$ , получаем автомобиль с избыточной поворачиваемостью, у которого увеличение скорости приводит к снижению  $R_{п}^*$  и возрастанию бокового ускорения  $a_y$ , силы инерции  $F_{jy}$  и угла увода  $\delta_{yb2}$ . В результате возникает опасность заноса автомобиля.

У исследуемого автомобиля  $\eta_{пов} < 1$ . Следовательно, он обладает недостаточной поворачиваемостью и пониженной чувствительностью к управлению поворотом.

Рассмотрим возможности улучшения управляемости путем подбора параметра  $k_{\omega}$  управляющих воздействий  $\Delta\omega_{\theta}$ . Исследования проведем применительно к скорости  $v_x = 50$  км/ч.

График на рис. 5, в получен при использовании параметра  $k_{\omega} = 3$ . Величина управляющего воздействия составляла  $\Delta\omega_{\theta} = 5,36$  град/с (см. рис. 6, в). Линия траектории  $R_{тр}$  вышла далеко за пределы ширины проезжей части виража.

При  $k_{\omega} = 5$  отклонение  $R_{тр}$  от осевой линии  $R_{о.л}$  заметно уменьшилось (рис. 10, а). Амплитуда управляющего сигнала при этом составляла  $\Delta\omega_{\theta} = 3,2$  град/с. Эффективность дальнейшего уменьшения сигнала  $\Delta\omega_{\theta}$  постепенно снижается. На рис. 10, б приведен результат при  $k_{\omega} = 7$  и  $\Delta\omega_{\theta} = 2,24$  град/с.

Такое поведение динамической системы управления обусловлено ее высокой инерционностью. Она проявляется в начальной стадии перехода от прямолинейной траектории к круговой. С увеличением скорости автомобиля возрастают скорости инерционных элементов и накапливаемая ими кинетическая энергия, что приводит к увеличению времени переходных процессов и амплитуд колебаний всех оцениваемых фазовых координат.

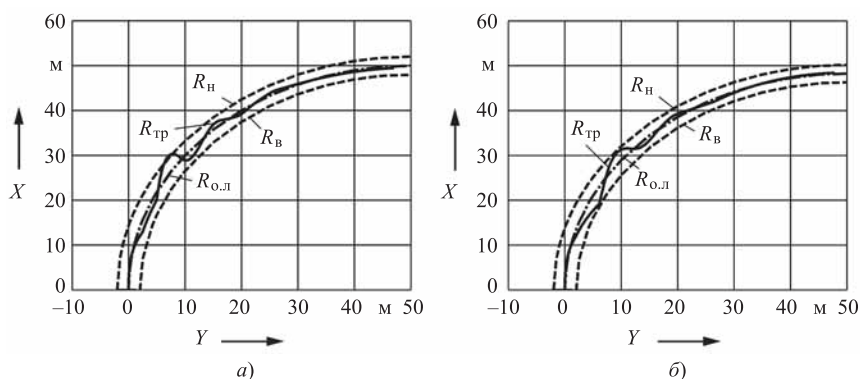


Рис. 10. Отклонение радиуса траектории движения автомобиля  $R_{тр}$  от осевой линии виража  $R_{о.л}$  при  $k_{\omega} = 5$  (а) и при  $k_{\omega} = 7$  (б)

нат. Это хорошо видно из графиков на рис. 7–9. В результате при превышении скорости движения некоторого предельного значения урегулировать должным образом отклонение от заданной траектории не представляется возможным.

Таким образом, для тяжелого грузового автомобиля ограничением скорости маневра при высоких значениях коэффициента сцепления является не опасность отрыва колес от дороги или бокового скольжения, а инерционность его компонентов.

## Заключение

1. Разработана математическая модель процесса движения автомобиля на вираже, предназначенная для определения параметров управляемого и устойчивого движения при заданных параметрах криволинейной траектории.

2. В предложенной модели предусмотрено формирование дискретных управляющих воз-

действий на поворотные колеса для обеспечения допустимого отклонения радиуса траектории от осевой линии виража, определение нормальных и поперечных реакций, углов увода колес, угла крена подпрессоренной массы.

3. Приведены результаты моделирования движения грузового автомобиля категории  $N_3$  на вираже и дана оценка возможных причин потери управляемости и устойчивости в заданных дорожных условиях.

4. Модель предназначена для использования на начальной стадии проектирования автомобиля при определении параметров, обеспечивающих выполнение технических требований на показатели управляемости и устойчивости.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шведовский П. В. Изыскания и проектирование автомобильных дорог. В 2 ч. Ч. 1. План, земляное полотно: учеб. пособие / П. В. Шведовский, В. В. Лукша, Н. В. Чумичева. — Минск: Новое знание. — М.: ИНФРА-М, 2016. — 445 с.
2. Тарасик В. П. Теория движения автомобиля: учебник для вузов. — СПб.: БХВ-Петербург, 2006. — 478 с.
3. Тарасик В. П. Математическое моделирование технических систем: учебник. — Минск: Новое знание. — М.: ИНФРА-М, 2017. — 592 с.
4. Молибошко Л. А. Компьютерные модели автомобилей: учебник. — Минск: Новое знание. — М.: ИНФРА-М, 2012. — 295 с.

## 8000-й полуприцеп SCHMITZ CARGOBULL



В конце августа 2020 г. 8000-й полуприцеп Schmitz Cargobull S.CS был передан заказчику. Им оказалось ООО "Полуприцеп" — молодая, быстро растущая компания, которая занимается долгосрочной и краткосрочной арендой. Эксплуатировать полуприцеп будет ООО "Лагранж". Полуприцепы S.CS со сдвигаемым боковым тентом — один из самых ходовых продуктов компании. За счет продуманной конструкции погрузка и разгрузка проходят быстрее и требуют меньше усилий со стороны водителя. Данные транспортные средства длиной 13,62 м соответствуют стандартам Европейского таможенного союза и приспособлены для всех способов фиксации груза. Первый завод Schmitz Cargobull в России открылся в 2013 г. в Ленинградской области. В 2016 г. производство было перенесено в дер. Духанино Московской области. Производительность предприятия, на котором собираются тентовые и самосвальные полуприцепы, составляет 12 ед. техники в день. Площадь сборочного цеха — 1200 м<sup>2</sup>. Здесь же расположен склад запчастей. Киты для сборки полуприцепов поставляются из Германии.

Соб. инф.

УДК 629.33

DOI: 10.36652/1684-1298-2020-11-30-34

А. В. Пузаков, канд. техн. наук, доцент, e-mail: and-rew78@yandex.ru,

Д. А. Смирнов, соискатель, Оренбургский государственный университет (ОГУ), г. Оренбург

## РАЗРАБОТКА НАГРУЗОЧНОГО РЕЖИМА СТАРТЕРНОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ

*Для оперативного мониторинга технического состояния стартерной аккумуляторной батареи необходимо знать, как изменяются ее параметры в процессе эксплуатации. Выявление неисправностей аккумуляторной батареи возможно на основе сравнительной оценки изменения выходного напряжения в типовых нагрузочных режимах. Целью статьи является разработка нагрузочного режима, содержащего четыре последовательных стадии нагружения с вариацией разрядного тока и времени нагружения. Экспериментально установлено изменение выходного напряжения как работоспособной аккумуляторной батареи, так и в результате моделирования характерных неисправностей. Дальнейшие исследования будут направлены на составление массива данных для системы оперативного диагностирования стартерных аккумуляторных батарей на борту транспортного средства.*

**Ключевые слова:** стартерная аккумуляторная батарея, нагрузочный режим, разрядный ток, моделирование неисправностей.

*For operational monitoring of the technical condition of the starter battery, it is necessary to know how its parameters change during operation. Detection of battery failures is possible based on a comparative assessment of changes in the output voltage in typical load modes. The purpose of the article is to develop a load mode containing four successive loading stages with variations in the discharge current and loading time. Experimentally, the change in the output voltage of both a working battery and because of simulating characteristic faults has been established. Further research will be aimed at compiling an array of data for the system of rapid diagnostics of starter batteries on-board the vehicle.*

**Keywords:** starter battery, load mode, discharge current, fault simulation.

В современных автомобилях неуклонно увеличивается количество электрооборудования. Все больше появляется автомобилей, использующих в качестве источника энергии только электричество. Появляются автомобили, способные автономно вырабатывать электроэнергию, например автомобили на топливных элементах. Растет число автомобилей с гибридной силовой установкой. На таких автомобилях электрооборудование можно смело назвать самой важной из всех бортовых систем.

На борту автомобилей с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) электрооборудование играет не менее важную роль, обеспечивая как запуск двигателя, так и стабильную работу всех остальных систем автомобиля. Ужесточение экологических требований, необходимость повышения комфорта, топливной экономичности приводят к созданию соответствующих электрических и электронных систем.

От исправности электрооборудования зависит работоспособность автомобиля в целом. При выходе из строя аккумуляторной батареи становится

невозможным запуск двигателя. На данный момент в конструкции не предусмотрены устройства, позволяющие предупреждать подобные ситуации. Возможность оценивать техническое состояние аккумуляторной батареи на борту транспортного средства заметно повысит надежность автомобиля в целом.

В среднем около 30 % всех неисправностей автомобиля приходится на электрооборудование, причем каждый второй отказ связан с аккумуляторной батареей. В России расчетный срок службы стартерной аккумуляторной батареи составляет 2,7 года, что меньше гарантийного, равного 4 годам, или 90 тыс. км пробега. Более того, срок службы батареи может значительно снизиться вследствие неправильной эксплуатации батареи.

Основными неисправностями стартерных аккумуляторных батарей являются: снижение степени заряженности (34 % всех неисправностей), окисление полюсных выводов (18 %), оплывание активной массы (14 %), короткое замыкание (12 %), сульфатация пластин (10 %), ускоренный саморазряд (8 %), обрыв цепи внутри батареи (4 %) (рис. 1) [1–4].



**Рис. 1. Распределение неисправностей стартерных аккумуляторных батарей**

Наиболее частой неисправностью является снижение степени заряженности, которая чаще всего происходит либо из-за долгой автономной работы батареи, либо если мощность задействованных потребителей превышает возможности автомобильного генератора. Проще говоря, чаще всего аккумуляторная батарея не сломана, а не заряжена. Уменьшение заряда характеризуется, в первую очередь, снижением напряжения на выводах, что приводит к возможным перебоям в работе потребителей. Сюда же можно отнести отстающий аккумулятор, когда потеря заряда происходит в одном из аккумуляторов батареи.

Еще одной распространенной неисправностью является сульфатация пластин аккумулятора. Этот дефект возникает из-за неправильной эксплуатации аккумулятора, и приводит к образованию труднорастворимых кристаллов сульфата свинца на пластинах. Кристаллы уменьшают рабочую поверхность пластин, снижая тем самым емкость аккумулятора. При слабой сульфатации аккумулятор можно восстановить специальным циклом, путем его зарядки малым током. Сильная же сульфатация восстановлению не поддается [5].

Короткое замыкание разноименных электродов обнаруживается по кипению электролита во время заряда. Этот дефект чаще всего связан с повреждением сепараторов в процессе сборки, неправильным размещением сепаратора в блоке пластин, отклонением от заданных чертежами размеров сепаратора, низким качеством материала сепараторов, перекосом отдельных пластин в блоке. При наличии такого дефекта батарея в определенных условиях, например при постоянной эксплуатации в летнее время, может сохранять работоспособность. Однако ее пусковая мощность значительно снижается, так как за время

бездействия (ночная стоянка) значительная часть энергии в одном из аккумуляторов расходуется на работу в короткозамкнутой паре. При бездействии такой батареи в течение одной-двух недель короткое замыкание в каком-либо аккумуляторе может быть легко установлено путем измерения плотности электролита. В дефектном аккумуляторе плотность электролита снижается более интенсивно, чем в остальных аккумуляторах [6].

**Окисление полюсных выводов.** Обычно в литературе эта неисправность называется именно так. Говоря точнее, это окисление места контакта полюсных выводов и клемм. Данный дефект может возникнуть из-за отсутствия должного ухода за аккумулятором, а именно очистки полюсных клемм и выводов. Такая неисправность может характеризоваться ускоренным снижением разрядной емкости. Так как из-за ржавчины повышается сопротивление, что эквивалентно увеличению нагрузки на батарею.

**Разрушение или оплывание активной массы.** Может возникнуть от длительного использования батареи с высокой степенью разряженности или же с высокой степенью заряда, но низким уровнем электролита; от вибраций, вызванных плохим креплением аккумулятора; а также после замерзания разряженной батареи в зимнее время. Неисправность проявляется быстрым снижением напряжения после разряда на стартер.

**Ускоренный саморазряд аккумулятора.** Нормальный саморазряд характеризуется тем, что заряженная батарея в течение 14 суток и при температуре электролита, равной 20 °С, теряет не более 10 % емкости. Возникает из-за замыкания выводов грязью, электролитом на поверхности крышки, замыкания разноименных электродов осыпающимся активным веществом, металлических примесей в электролите.

Обрыв цепи между аккумуляторами может произойти или из-за заводского брака, или же в результате длительного использования при сильных вибронагрузках. Разрыв внутренней цепи чаще всего происходит в местах скрепления деталей сваркой, из-за отклонения от расчетного режима сварки или при наличии раковин и пустот, возникающих в свариваемых деталях при нарушении режимов их отливки. Окончательный вывод о причине обрыва цепи можно сделать на основании вскрытия батареи и обследования разрушенного соединения. В некоторых случаях обрыв цепи может быть спровоцирован у качественных батарей при продолжительном (затруднительном) пуске двигателя. В любом

случае такая неисправность приводит к полному отказу батареи. Проявлением этой неисправности является отсутствие разряда на стартер при наличии потенциала между полюсами батареи.

Полная коррозия решеток положительных электродов также может быть вызвана нарушением условий эксплуатации. Перезаряд — из-за высокого напряжения на генераторе, а также работой автомобиля в режиме такси. Как показывает практика и научные труды, такая неисправность чаще всего возникает при эксплуатации аккумуляторной батареи в условиях жаркого климата.

Возникновение неисправностей сопровождается изменением параметров аккумуляторной батареи, таких как разрядный ток и выходное напряжение. Цель данной работы — установить характер зависимости изменения этих параметров от режима нагружения в процессе возникновения и развития характерных неисправностей стартерных аккумуляторных батарей.

Сложность исследования неисправностей стартерных аккумуляторных батарей заключается в необходимости обследования большого количества батарей с разными техническими характеристиками. Также существует сложность с определением природы поломки и ее степени. Поэтому более предпочтительным вариантом является моделирование неисправностей в лабораторных условиях [7].

## Нагрузочный режим

Получение исходных данных возможно путем проведения испытаний при определенной нагрузке стартерной аккумуляторной батареи. Нагрузочный режим стартерной аккумуляторной батареи — это установленная последовательность тестов, характеризующихся заданной величиной нагрузки и временем ее воздействия.

Разработанный нагрузочный режим должен учитывать специфику работы электрооборудования автомобиля, и будет коренным образом отличаться от представленных ранее [8]. Современные аккумуляторные батареи проектируются таким образом, чтобы даже при вышедшем из строя автомобильном генераторе снабжать электроэнергией все штатные потребители одновременно. Поэтому тестирование следует проводить как при штатной работе, так и в режимах наибольшей нагрузки.

Часто для тестирования работоспособности аккумуляторной батареи ее в течение некоторого времени разряжают током 25 А до конечного

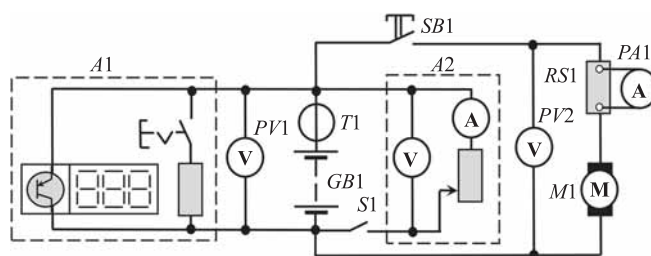
напряжения на выводах батареи 10,5 В. Такой режим работы используется для оценки резервной емкости аккумуляторной батареи. Наибольшей нагрузкой для батареи является режим запуска двигателя, при котором разрядный ток может достигать 500 А и более. Промежуточным режимом может служить проверка аккумуляторной батареи нагрузочной вилкой, обеспечивающей нагрузку в пределах 180—250 А. Именно в этих режимах и предполагается проводить тестирование стартерной аккумуляторной батареи.

На данном этапе исследования не известно, какие из тестов будут лучше всего выявлять неисправности в работе аккумуляторной батареи. Поэтому в дальнейшем нагрузочный цикл, полученный в ходе этой работы, может видоизменяться. Общая электрическая схема нагрузочного цикла приведена на рис. 2.

Разработанный нагрузочный цикл состоит из четырех режимов тестирования: подключение к стартерному электродвигателю, заторможенному с помощью гидравлической мессдозы (силоизмерительное устройство, основанное на использовании манометрического датчика); подключение к нагрузочной вилке; подключение к стартерному электродвигателю, работающему в режиме холостого хода; подключение к нихромовой спирали с эталонной нагрузкой 25 А.

Длительность первого режима нагружения не должна превышать 5 с, сила тока составляет 500—600 А. На автомобиле такая сила тока может быть достигнута только при крайне низкой температуре окружающего воздуха (менее  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) вследствие увеличения вязкости моторного масла.

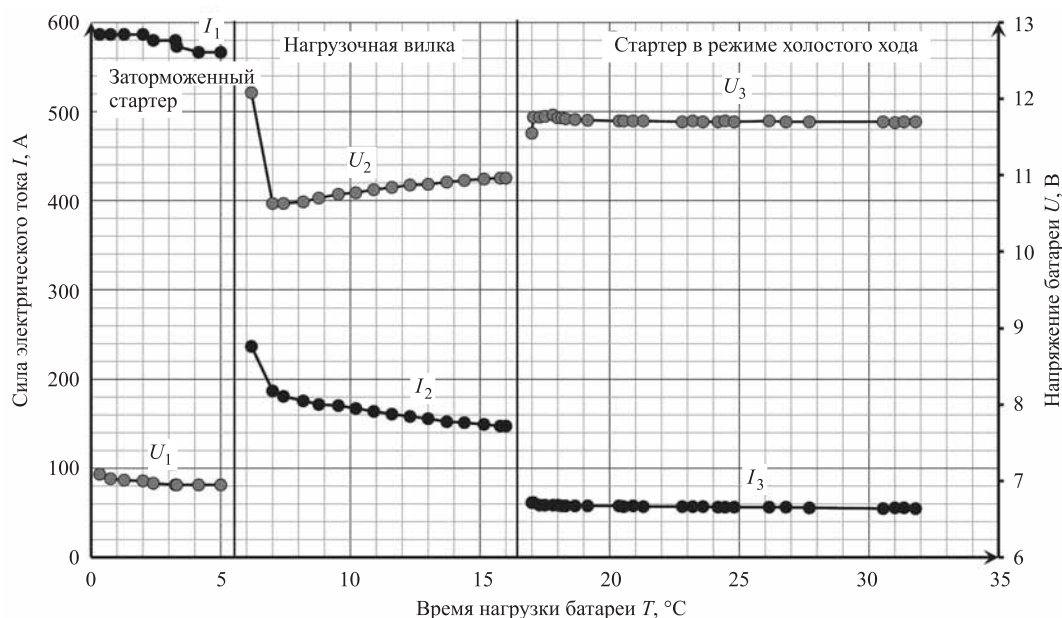
При обычной проверке аккумуляторной батареи нагрузочной вилкой время нагрузки составляет 5 с, однако для разработанного цикла оно увеличено до 10 с.



**Рис. 2. Схема проведения экспериментов:**

A1 — нагрузочная вилка Н-2005; A2 — переносной вольт-амперметр КИ-1093; GB1 — стартерная аккумуляторная батарея 6СТ-60VЛ; M1 — стартерный электродвигатель 2120-3708010; PA1 — амперметр; PV1 — мультиметр Testo 760-2; PV2 — вольтметр; RS1 — токовый шунт 500 А; T1 — токоизмерительные клещи Testo 770-2; S1 — выключатель; SB1 — пусковая кнопка





**Рис. 3. Изменение разрядного тока и напряжения работоспособной полностью заряженной аккумуляторной батареи**

Длительность третьего режима нагружения не должна превышать 30 с во избежание перегрева стартерного электродвигателя. Для разработанного цикла ограничимся 15 с.

Наконец, длительность последнего режима нагружения выбирается в диапазоне 2,5–3 мин.

Для определения характера изменения напряжения и силы тока аккумуляторной батареи в процессе нагружения использовался цифровой мультиметр Testo 760-2 и токоизмерительные клещи Testo 770-2.

На рис. 3 приведены зависимости разрядного тока и напряжения работоспособной полностью заряженной аккумуляторной батареи [9].

Анализируя данные рис. 3, можно заметить, что в первом режиме нагружения разрядный ток составил 560–580 А, напряжение около 7 В; во втором режиме — 140–180 А и 10,6–11,0 В; в третьем — 52–56 А и 11,8 В; в четвертом — 25–27 А и 12,4 В.

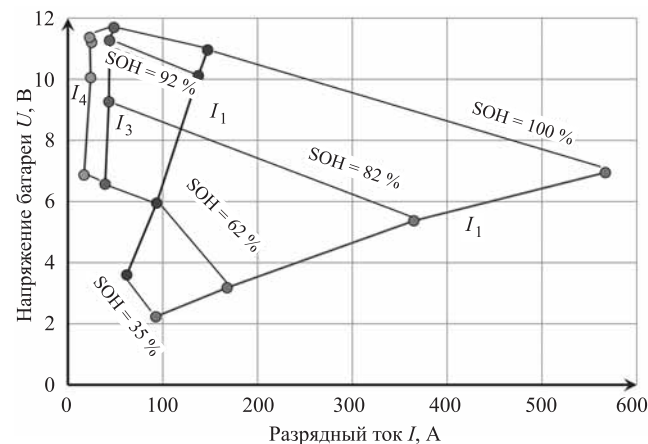
Для обоснования выбора конкретного режима нагружения необходимо провести испытания стартерной аккумуляторной батареи с характерными неисправностями и определить наиболее информативный. В работе экспериментально установлен характер изменения разрядного тока и напряжения батареи для глубокого разряда, окисления клемм и короткого замыкания в одном из аккумуляторов. Перед каждым этапом аккумуляторная батарея вновь полностью заряжалась

Аккумуляторная батарея разряжалась до конечного напряжения 12,0, 11,5 и 11,0 В

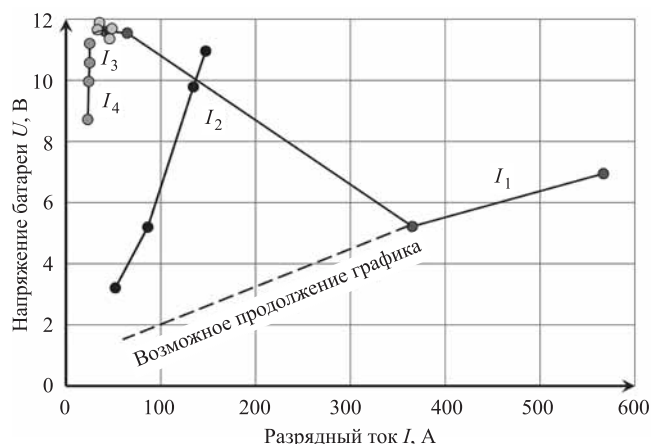
(моделирование глубокого разряда) и для каждого случая также определялся характер изменения параметров аккумуляторной батареи в каждом из режимов нагружного цикла. Результаты представлены на рис. 4.

Из рис. 4 следует, что наиболее информативными к глубокому разряду являются первый и второй режимы нагружения.

На втором этапе последовательно с аккумуляторной батареей подключался резистор сопротивлением 0,025, 0,05 и 0,1 Ом (моделирование окисления клемм и выводов). Результаты эксперимента представлены на рис. 5.



**Рис. 4. Изменение параметров аккумуляторной батареи при моделировании глубокого разряда**



**Рис. 5. Изменение параметров аккумуляторной батареи при моделировании окисления полюсных выводов**

Сравнение рис. 4 и 5 показывает, что наиболее информативным на примере двух неисправностей является второй режим нагружения. Первый режим нагружения дал сбой, поскольку стартер работает в режиме "пулеметного эффекта", т. е. шестерня непрерывно входит и выходит из зацепления. Третий режим нагружения также не информативен, поскольку снижение тока сопровождается повышением напряжения.

Таким образом, не все из выбранных режимов нагрузочного цикла чувствительны к неисправностям аккумуляторной батареи. По результатам эксперимента наибольшей чувствительностью обладает второй режим нагружения (нагрузочная вилка). Дальнейшие исследования будут посвящены исследованию изменения параметров аккумуляторной батареи при моделировании таких неисправностей, как отстающий аккумулятор, обрыв внутренней цепи батареи, сульфатация и снижение остаточной емкости.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Brik K. & Ammar F.** (2008). The Fault tree analysis of the lead acid battery's degradation. *Journal of Electrical Systems*. 4.
2. **Yahmadi R., Brik K. & Ammar F.** (2016). Failures analysis and improvement lifetime of lead acid battery in different applications. *Proceedings of Engineering & Technology (PET)*. P. 148—154.
3. **Kim S. T., Jeongbin L., Kim U. & Shin C. B.** (2013). Modeling of the lifetime prediction of a 12-V automotive lead-acid battery. *Journal of Energy Engineering*. 22. 10.5855/ENERGY.2013.22.4.338.
4. **Ruetschi P.** (2004). Aging mechanisms and service life of lead-acid batteries. *Journal of Power Sources*. Vol. 127. Issue: 1-2. P. 33—44.
5. **Catherino H., Feres F. & Trinidad F.** (2004). Sulfation in lead—acid batteries. *Journal of Power Sources*. 129. 113—120. 10.1016/j.jpowsour. — 2003.11.003.
6. **A Mathematical Model for the Simulation of New and Aged Automotive Lead-Acid Batteries.** / Cugnet M., Laruelle S., Grugeon S., Sahut B., Sabatier J., Tarascon J-M. & Oustaloup A. (2009). / *Journal of The Electrochemical Society*. 156. A974-A985. 10.1149/1.3224868.
7. **Пузаков А. В., Смирнов Д. А.** Моделирование неисправностей стартерных аккумуляторных батарей // *Прогрессивные технологии в транспортных системах: сборник материалов XIV Международной научно-практической конференции.* — Оренбург: ОГУ, 2019. — С. 523—530.
8. **Richter G.** (1993). Improvement of bench life-tests for automotive batteries. *Journal of Power Sources*. 42. P. 231—236. 10.1016/0378-7753(93)80151-E.
9. **Смирнов Д. А.** Исследование параметров стартерной аккумуляторной батареи // *Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых: сборник материалов IV Международной научно-практической конференции, 6—8 февраля 2020 г.* — Омск: СибАДИ. — 2020. — С. 65—68.

## В Твери открылся дилерский центр "КАМАЗ"

В Твери состоялось открытие нового дилерского центра "РУМОС-Комтранс", официального субъекта дилерской сети ПАО "КАМАЗ". Центр размещён на 165 км автодороги "Москва — Санкт-Петербург".

В торжественном мероприятии приняли участие замминистра экономического развития Тверской области Михаил Дорофеев, замминистра транспорта области Сергей Верхоглядов, директор по продуктовой политике ПАО "КАМАЗ" Эльдар Аминов, руководитель службы развития дилерской сети ПАО "КАМАЗ" Алина Мотыгулина, директор по развитию сервиса ООО "АвтоЗапчасть КАМАЗ" Александр Зидыбаев, представители администрации Твери.

В рамках торжественного мероприятия была организована презентация магистральных грузовиков КАМАЗ-54901 и КАМАЗ-5490, самосвалов КАМАЗ-65115, КАМАЗ-6520. Также состоялись круглые столы с экспертами и представителями ПАО "КАМАЗ" и АО "КАМАЗ-Лизинг", где обсуждались перспективы развития газомоторной техники, вопросы сервиса и гарантийного сопровождения автотехники КАМАЗ, а также возможности приобретения техники в лизинг от производителя.

"РУМОС-Комтранс" стал официальным дилером ПАО "КАМАЗ" в 2019 г. Открытый в Твери дилерский центр — первый совместный проект двух компаний. Производственные мощности центра позволяют обслуживать 20—25 грузовых автомобилей и прицепов в сутки. Общая площадь центра — более 2500 кв. м.

*Пресс-служба ПАО "КАМАЗ"*

**В. Е. Овсянников**, канд. техн. наук, доцент, e-mail: vik9800@mail.ru, ФГБОУ ВО "Курганский государственный университет", Российская Федерация,  
**В. И. Васильев**, д-р техн. наук, профессор, e-mail: vvirof@rtural.ru, ФГБОУ ВО "Курганский государственный университет", Российская Федерация

## ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЧУГУННЫХ ГИЛЬЗ ДВИГАТЕЛЕЙ СТРОИТЕЛЬНО-ДОРОЖНЫХ МАШИН

*В предлагаемой статье рассмотрена возможность применения термодиффузионного поверхностного легирования для повышения долговечности гильз двигателей строительно-дорожных машин. Показано, что использование упрочнения позволяет получать слой толщиной до 3 мм. При этом долговечность после ремонтного растачивания не снижается ввиду обратного распределения твердости в упрочненном слое.*

**Ключевые слова:** гильзы, упрочнение, долговечность, строительно-дорожные машины, ремонт, растачивание.

*The proposed article considers the possibility of using thermodiffusion surface doping to increase the durability of motor casings of construction-road machines. It is shown that the use of hardening allows to obtain a layer with a thickness of up to 3 mm. At the same time, the durability after repair stretching does not decrease due to the reverse hardness distribution in the reinforced layer.*

**Keywords:** casings, hardening, durability, construction and road machines, repair, stretching.

### Введение

Довольно распространенным решением, которое используется в двигателях строительно-дорожных машин, являются гильзы цилиндров из серого чугуна (например, 7406.1002021 или 7406.1002021-20). Данные узлы относятся к ответственным и к ним предъявляются повышенные требования, в том числе по долговечности.

Установлено, что использование поверхностного упрочнения [1, 2] позволяет существенно повысить долговечность гильз. Например, в работе [2] для решения данной задачи использовалось оксидирование. При этом ресурс гильз удалось увеличить на 20–30 %.

Однако большинство имеющихся на сегодняшний день методов и способов упрочнения чугуна [3, 4] позволяют получить толщину упрочненного слоя до 0,2 мм. При этом в случае растачивания в ремонтный размер упрочненный слой удаляется полностью. Соответственно долговечность узлов после ремонта существенно ниже, чем у новой детали.

Был разработан способ термодиффузионного упрочнения чугуна [5], который позволяет получать слой толщиной до 3 мм. При этом твердость в слое возрастает по толщине.

**Целью работы** является исследование влияния термодиффузионного упрочнения на долговечность чугунных гильз цилиндров двигателей строительно-дорожных машин и разработка методики проектирования операций ремонта узлов.

### Расчетное определение наработки до отказа

В нашем случае для восстанавливаемой системы имеем следующее соотношение для определения наработки [6]:

$$L_{j+1}^I = L_j^I + L_{i,j+1}^I, \quad (1)$$

где  $L_{i,j+1}^I$  — наработка 1-й детали между  $j$  и  $j + 1$  отказами.

Однако для удобства вводятся весовые коэффициенты  $\alpha$ , тогда выражение принимает вид [6]:

$$L_{i,j+1}^I = \alpha_j L_{j=1}^I. \quad (2)$$

Тогда величина потока отказов может быть определена по следующей формуле [6]:

$$h_i(L) = \sum_{i=1}^m \varphi_{i,j}(L) \Delta L \cong \omega_i \Delta L, \quad (3)$$

где  $\varphi_{i,j}(L)$  — функция плотности распределения ресурса  $i$ -й детали до  $j$ -го отказа;  $\Delta L$  — интервал пробега.

Выражения для определения математического ожидания наработки и ее рассеяния можно представить следующим образом:

$$\bar{R} = \frac{I_{\max}(1 + v_h^2)}{I_h}, \quad (4)$$

$$\sigma_R = I_{\max} v_h \sqrt{1 + 2v_h^2} / I_h, \quad (5)$$

где  $v_h$  — коэффициент вариации,  $I_h$  — интенсивность износа.

С учетом того, что в двигателе  $n$ -гильз, выражения (4) и (5) примут вид:

$$R_1 = \bar{R} - \sigma_R \sqrt{\ln(n)}; \quad (6)$$

$$\sigma_1 = \pi \sigma_R / \sqrt{6 \ln(n)}. \quad (7)$$

В табл. 1 приведены результаты расчетов наработки для гильз 7406.1002021, 7406.1002021-20 и гильзы, упрочненной оксидом молибдена. Величины  $I_{\max}$  и  $v_h$  взяты из источника [6].

### Разработка методики проектирования операций ремонта деталей строительно-дорожных машин

Основным аспектом, который оказывает влияние на проектирование операций, является наличие в упрочненном слое ферритной каймы, которая обладает низкой твердостью и износостойкостью. С одной стороны, это обеспечивает благоприятный характер процесса приработки, так как слой с низкой твердостью достаточно быстро изнашивается и при этом образуется оптимальная микрогеометрия поверхностей контакта. Однако при жестких требованиях к величине допускаемого износа ферритную кайму необходимо удалять в обязательном порядке.

В качестве дополнительного критерия, который определяет необходимость последующей механической обработки слоя, можно ввести следующее соотношение:

$$I_{\max} < k[h_{ДС}], \quad (8)$$

где  $I_{\max}$  — допустимый износ слоя;  $[h_{ДС}]$  — толщина дефектного слоя;  $k$  — коэффициент запаса.

Если неравенство (8) справедливо, значит, ферритную кайму необходимо удалять.

Последовательность проектирования операций термодиффузионного поверхностного легирования имеет следующий вид:

1. Задается величина требуемого ресурса работы и допустимого износа.
2. Проверяется условие (8);
3. Определяется толщина упрочненного слоя  $[h_{УС}]$ .
4. Определение требуемой величины наработки  $[R]$  через предельный износ  $I_{\max}$ .
5. Определение ресурса работы  $R$ .
6. Проверка условия  $R \geq [R]$ .
7. При невыполнении условия в пункте 6 корректировка величины  $[h_{УС}]$ .
8. В зависимости от условий работы узла выбирается легирующий элемент.
9. Назначаются режимы упрочнения.

Если предполагается использование метода ремонтных размеров, то пункты 4—7 выполняются циклически для числа ремонтных размеров  $n$ . При этом величина ремонтного размера рассчитывается по известным зависимостям, приведенным в литературе [6]. Графически алгоритм приведен на рис. 1.

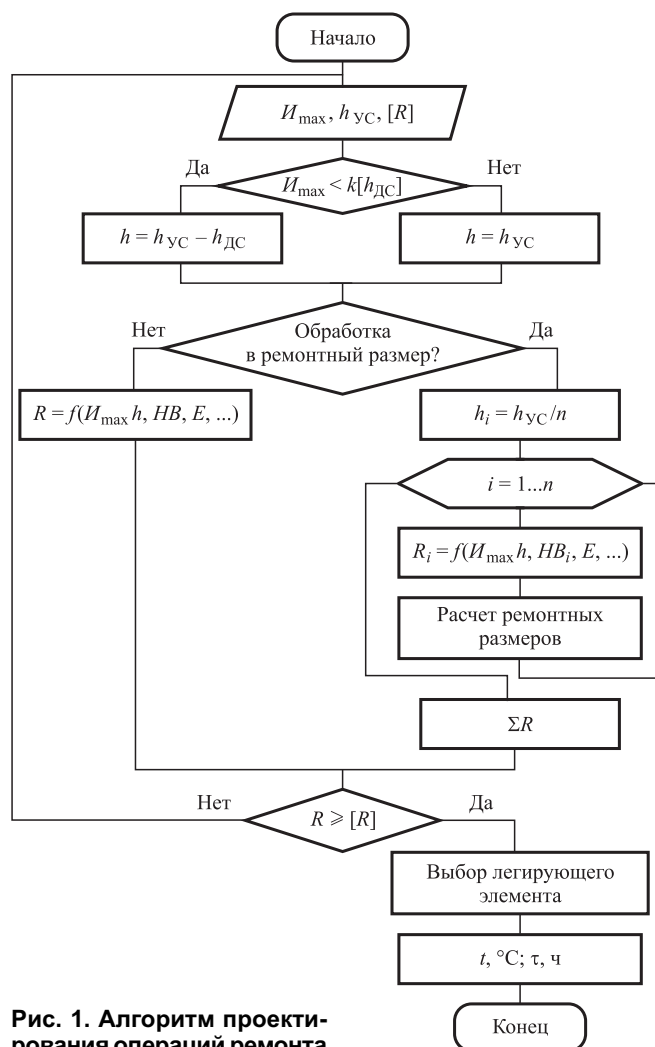
В табл. 2 приведены значения наработки для случая  $n = 4$  (обработка в ремонтный размер выполняется 4 раза).

На рис. 2 приведены зависимости вероятности безотказной работы для рассматриваемых случаев. Из приведенных данных следует, что в случае применения термодиффузионного легирования долговечность гильз после ремонтного растачивания не снижается, а возрастает.

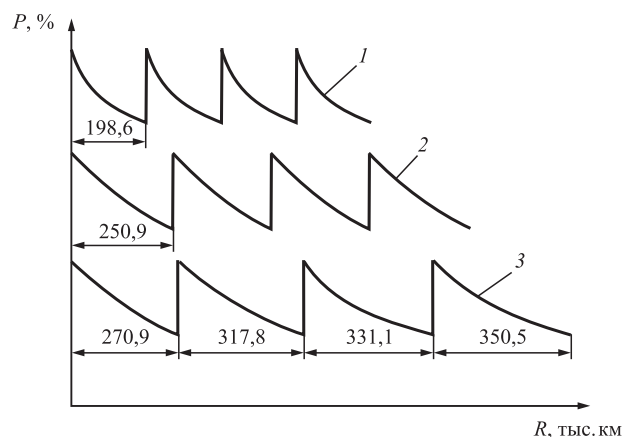
Таблица 1

**Элементы операции и их продолжительность по вариантам планировки рабочего места**

Наименование детали	Материал, упрочнение	$I_h$ , мкм/тыс.км	$R_1$ , тыс. км	$\sigma_1$ , тыс. км.
Гильза 7406.1002021	Серый чугун, без упрочнения	1,2	198,6	104,1
Гильза 7406.1002021-20	Легируемый серый чугун, закалка	0,95	250,9	131,5
Гильза	Поверхностное упрочнение в контакте с оксидом молибдена	0,88	270,9	141,9



**Рис. 1. Алгоритм проектирования операций ремонта**



**Рис. 2. Вероятность безотказной работы:**

1 – серый чугун без упрочнения; 2 – серый чугун с закалкой; 3 – серый чугун, поверхностное упрочнение в контакте с оксидом молибдена

### Оценка экономического эффекта от использования гильз с упрочненным слоем

Величину дополнительных затрат на изготовление гильзы с диффузионным слоем можно определить следующим образом [7]:

$$C_{\text{доп}} = K_{\text{НАКЛ}}(C_{\text{ЗП}} + C_{\text{РМ}}),$$

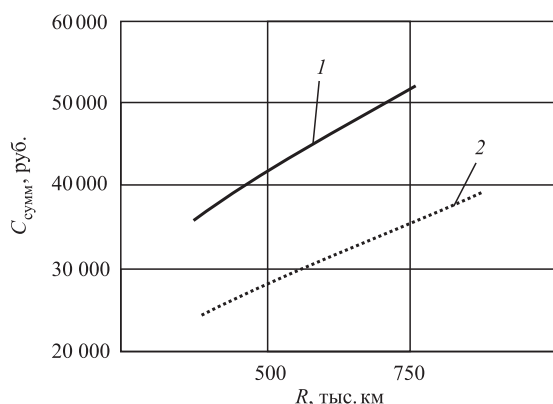
где  $K_{\text{НАКЛ}}$  – коэффициент, который учитывает накладные расходы;  $C_{\text{ЗП}}$  – расходы на заработную плату рабочих;  $C_{\text{РМ}}$  – затраты на расходные материалы.

В качестве расходных материалов используются оксиды легирующих элементов, а также

Таблица 2

#### Результаты расчетов

Наименование детали	Материал, упрочнение	$I_h$ , мкм/тыс. км	$R_1$ , тыс. км	$\sigma_1$ , тыс. км
Гильза 7406.1002021	Серый чугун, без упрочнения	1,2	198,6	104,1
		1,2	198,6	104,1
		1,2	198,6	104,1
		1,2	198,6	104,1
Гильза 7406.1002021-20	Легированный серый чугун, закалка	0,95	250,9	131,5
		0,95	250,9	131,5
		0,95	250,9	131,5
		0,95	250,9	131,5
Гильза	Поверхностное упрочнение в контакте с оксидом молибдена	0,88	270,9	141,9
		0,75	317,8	166,3
		0,72	331,1	173,5
		0,68	350,5	183,7



**Рис. 3. Зависимость затрат от наработки:**

1 — гильза из легированного чугуна; 2 — гильза с упрочненным слоем

вспомогательные материалы, используемые для предохранения гильз от окисления.

Стоимость комплекта для двигателя ЯМЗ 236 будет:  $C_{\text{КОМПЛ}} = 318 \cdot 8 = 2544$  руб.

Стоимость нового комплекта гильз из серого чугуна составляет 22 000 руб., из серого чугуна, легированного хромом — 36 000 руб. Используя данные из главы 3, можно получить зависимости затрат от наработки, которая складывается из следующих составляющих:

$$C_{\text{СУММ}} = C_{\text{КОМПЛ}} + C_{\text{ДОП}} + C_{\text{РЕМ}},$$

где  $C_{\text{РЕМ}}$  — затраты на ремонт.

На рис. 3 приведены результаты расчетов.

Таким образом, величина экономии составляет 12 546 руб. в абсолютных значениях. Если значения затрат перевести в удельные величины, то значение экономии составляет 38 %.

## Заклучение

Таким образом, использование чугуна с упрочненным слоем дает возможность увеличить долговечность гильз двигателей на 20—25 % по сравнению с исходным материалом. Данный результат сопоставим с лучшими методами упрочнения чугунов.

Наличие слоя толщиной до 3 мм с обратным распределением твердости дает возможность по-

вышения эффективности растачивания в ремонтный размер. С одной стороны, пропадает необходимость в повторном упрочнении после удаления припуска под ремонтный размер, а с другой — долговечность гильз после ремонтного растачивания не снижается, а возрастает.

Величина экономии от использования комплекта гильз с упрочненным слоем составляет 12 546 руб. в абсолютных значениях. Если значения затрат перевести в удельные величины, то значение экономии составляет 38 %.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Hokhlov A. L., Nurutdinov A. Sh., Hokhlov A. L., Salakhutdinov I. R.** Laboratory researches of the metallized sleeves of cietcylinders // Science and Education: Materials of the III international research and practice conference. — S. Munchen. — 2013. — P. 149—152.
2. **Апсин В. П. и др.** Специальный курс ремонта автотранспортных средств: учебное пособие. — Оренбург: изд-во ИПК ГОУ ОГУ, 2008. — 172 с.
3. **Бурмукулов Ф. Х., Окин М. А., Иванов В. И.** Влияние физико-механических свойств и остаточных напряжений электроискровых покрытий на износостойкость соединений // Ремонт, восстановление, модернизация. — 2009. — № 2. — С. 17—23.
4. **Девойно О. Г. и др.** Поверхностное упрочнение серого чугуна совместной лазерной и ультразвуковой обработкой / [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/5511/%D0%A1.%203%20%206.pdf?sequence=1>.
5. **Гуревич Ю. Г., Овсянников В. Е., Фролов В. А.** Диффузионное хромирование деталей из феррито-перлитного серого чугуна // Машиностроение и инженерное образование. — 2011. — № 2 (27). — С. 2—10.
6. **Лукинский В. С., Зайцев Е. И.** Прогнозирование надежности автомобилей. Л.: Политехника, 1991. — 224 с.
7. **Хохлов А. Л.** Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей нанесением покрытий на детали цилиндропоршневой группы бензиновых двигателей: дис. ... доктора технических наук: 05.20.03. [Место защиты: Пензенский гос. агр. ун-т]. — Пенза, 2017. — 318 с.

**В. А. Грушников**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, e-mail: v.grushnikov@mail.ru, ВИНТИ РАН, г. Москва

## МЕРОПРИЯТИЯ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА. ЧАСТЬ 3

*Экологично безопасная в эксплуатации на автомобильных дорогах общего пользования, без учета нагрузки на окружающую среду в процессе генерирования электроэнергии, электрифицированная система автомобильного привода с разной степенью успешности осуществляется различными технологиями, пока еще слишком затратными для массовой реализации в практических транспортных приложениях.*

**Ключевые слова:** автомобильные колесные транспортные средства, топливная энергия, двигатели внутреннего сгорания, экологическая безопасность, электрификация.

*Ecologically safe in operation on public roads, without taking into account the environmental load in the process of generating electricity, an electrified car drive system with varying degrees of success is carried out by various technologies that are still too costly for mass implementation in practical transport applications.*

**Keywords:** automotive wheeled vehicles, fuel energy, internal combustion engines, environmental, safety, electrification.

Повышение экологической безопасности автомобильного транспорта обеспечивается реализацией различных конструктивно-технологических мероприятий совершенствования колесных транспортных средств (КТС), среди которых присутствуют отдельные и комплексные кардинальные и радикальные эволюционные и революционные меры. И внимание разработчиков передовых технологий уделяется различным проявлениям оптимизации по критерию экологической безопасности, начиная с использования альтернативных традиционным углеводородным в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) источников энергии обычных силовых агрегатов приводов, заканчивая их инновационными типами. Это разнообразие позволяет на каждом конкретном этапе совершенствования выбрать приемлемый вариант реализации рассматриваемых мероприятий для достижения поставленной цели с учетом отдельного КТС и парка подвижного состава разного уровня концентрации.

Так, например, по результатам аналитического и анкетного опросного исследования немецкой фирмы Fourmanagement, проведенного в транспортных предприятиях Германии с более 740 000 ед. подвижного состава с допустимой полной массой более 3,5 т, установлено [1], что из 42 500 ед., поступивших в эксплуатацию с 2017 г.,

25 000 ед. — главным образом, с допустимой полной массой более 12 т и 96 % из них — с дизельным приводом. Около 32 500 ед. грузового подвижного состава оснащены газодизелями на сжатом (15 600 ед.), сжиженном (12 350 ед.) природном газе и приводами на гибридной и чистой электротяге (4550 ед.). На основе этой статистики оценивается отношение транспортных предпринимателей к приводам на альтернативном топливе и инфраструктурная обеспеченность реализации концепции правительства Германии по электрификации транспортного процесса.

Не последнее место в ряду альтернативных источников экологически чистой энергии занимают водородные топливные элементы (ТЭ) бортового генерирования электроэнергии для тягового электродвигателя. Перспективное масштабирование на уровне конкретной энергогенерирующей производительности водородных ТЭ, адаптированных к реальной потребляемой мощности силового агрегата электроавтомобиля, позволит [2] реализовывать многообещающие энергоэффективные решения в сегменте коммерческих автомобильных КТС. Это наглядно демонстрируется по результатам сотрудничества коллективов исследователей из консалтингово-технологических компаний ElringKlinger из Деттингена/Эрмса, FEV из Аахена и Технического университета

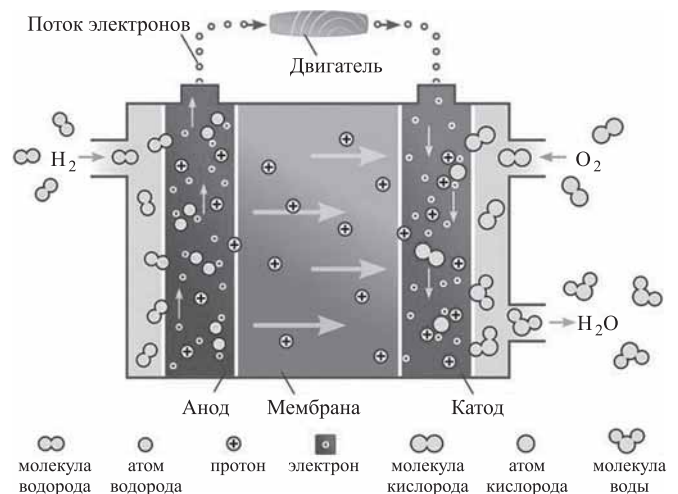
федеральной земли Северный Рейн-Вестфалия (Германия), разработавших, изготовивших, успешно откалибровавших и испытавших систему ТЭ на платформе энергетического модуля электромобиля на стенде в камере для климатических испытаний. Ее высокий потенциал для коммерческого транспорта с мощностью электропривода от 30 до 200 кВт продемонстрирован до 60 % повышенным коэффициентом полезного действия (КПД) электромобильной энергетики с ТЭ, зафиксированным по многочисленным фактам стендовых испытаний.

Система привода электромобилей может быть оптимизирована в плане энергоэффективности использованием усовершенствованных и эталонных ТЭ. Они приобретают все большую актуальность и расширенную область применения в контексте необходимости реализации амбициозных климатических природоохранных целей, достижение которых активно поддерживается законодательством об ограничении выбросов вредных веществ с отработавшими газами систем выпуска силовых агрегатов КТС.

Среди ТЭ все большую популярность приобретают водородные ТЭ с полимерной электролитной протонообменной мембраной. Их основными преимуществами являются короткое время зарядки и относительно большие расстояния автономного пробега. В аналитическом материале руководителя проектных разработок немецкой энергетической компании Steinbeis описывается [3] способ реализации традиционной электрохимической технологии генерирования электроэнергии ТЭ и основные компоненты и рабочие характеристики эталонной системы оценки эффективности ТЭ, использующихся в приводах электромобилей. Их максимально возможная на сегодняшний день энергоэффективность с теоретическим генерированием одним элементом напряжения электрического тока 1,23 В оценивается по КПД в 50–70 % при температуре около 80 °С.

Эффективность ТЭ, к сожалению, не устраняет проблемы их эксплуатации. Несмотря на уже 25-летний период, пока еще экспериментального, использования в легковых автомобилях, изобретенных в середине XIX века Уильямом Робертом Грове в виде гальванических элементов водородных ТЭ, они, несмотря на высокую удельную энергоемкость, не стали [4] массовым бортовым электрохимическим источником энергии электромобилей, как по причине не только их дороговизны, но и опасности.

Так, водородные ТЭ электропривода легкового автомобиля Mercedes-Benz семейства GLC



**Рис. 1. Принцип действия водородного топливного элемента**

с 4,4 кг водорода в бортовых резервуарах обеспечивают запас автономного хода 430 км. По заявлению производителя и по результатам испытательной реализации в имитационном ездовом цикле NEFZ это соответствует удельному потреблению водорода в 0,97 кг/100 км. Водородные ТЭ энергетической установки южнокорейского легкового автомобиля Hyundai Nexho с резервуаром водорода вместимостью 6,33 кг обеспечивает запас хода в 756 км с удельным потреблением водорода 0,84 кг/100 км. А установленная на японской Toyota Mirai водородная топливная энергетическая установка в обычном конструктивно-технологическом исполнении потребляет 0,76 кг/100 км водорода, а в реализации с пятикилограммовым резервуаром под повышенным давлением позволяет расходовать его за 667 км пробега, что соответствует удельному потреблению 0,7 кг/100 км.

Успешным примером реализации топливо-водородной энергетики в грузовом сегменте автомобилестроения является опытный автопоезд допустимой полной массой 34 т неназываемого немецкого разработчика с участием Технического университета Мюнхена с 34,5 кг водорода на борту с запасом автономного хода 400 км (в усовершенствованном еще только доводимым экспериментальном варианте — с потенциалом 1000 км). Хотя при сравнении с реальным 40-тонным автопоездом с полным топливным баком, пробегающим на одной заправке 25 00 км, этот успех выглядит весьма относительным.

Основным препятствием на пути массового прикладного использования в автомобильном приводе водорода по-прежнему является опасность результата его реакции окисления. Известно, что



водород горит при образовании воспламеняющейся смеси с кислородом в широком диапазоне содержания водорода от 4 до 75 %, а при его концентрации 18 % и более является взрывоопасной, а кроме того, поскольку водород в 14 раз легче воздуха, он быстро испаряется и его высокая летучесть приводит к проникновению через мельчайшие трещины и даже поры резервуаров.

Это было наглядно продемонстрировано исследователями во главе с Майклом Суэйном из Университета североамериканского Майами в 2003 г. В испытательном эксперименте они подожгли автомобили с разгерметизированной топливной системой: один с бензобаком, а другой с водородным баком. Как и ожидалось, оба автомобиля загорелись. Однако, автомобиль с бензиновым ДВС загорелся через 60 с, а КТС с водородными ТЭ достаточно долго оставался в значительной степени неповрежденным, потому что водород горел очень быстро в огромной вспышке пламени, которое выстрелило высоко над КТС.

Современные автомобили на ТЭ перевозят водород в газообразной форме в резервуарах под давлением 70 МПа и для предотвращения диффузии через поры стенок резервуаров с традиционными потерями не менее 12 % они должны быть многослойными и состоять из разных материалов. Танково-баковая система современного водородного легкового автомобиля Mercedes-Benz GLC F-Cell в настоящее время весит около 125 кг и вмещает около 4,4 кг водорода, что при удельном потреблении около 1 кг на 100 км позволяет на одной заправке проехать чуть более 400 км.

В автомобиле Tesla Model S с аналогичным диапазоном автономного хода аккумуляторная батарея весит около 650 кг. Все это свидетельствует о значительном усовершенствовании водородных ТЭ, достигших КПД в 83 %, хотя КПД автомобильного привода, в целом, из-за летучести водорода не превышает 50 %. Электрические приводы обладают КПД около 90 % при быстрой зарядке аккумуляторной батареи, снижающейся до 75 %.

И водород, и электричество уже почти вдвое эффективнее ДВС и при решении вопросов хранения и аккумуляции смогут реально претендовать на замену углеводородного топлива в системах питания автомобильных КТС с достаточной дальностью хода. Однако принцип, по существу двойного (гальванический электролиз получения с эффективностью 60...70 % — окислительной трансформации в электричество) преобразования водорода в электрический ток на борту КТС, никогда не сможет сделать водородное топливо столь

же эффективным, как аккумуляторная батарея, являющаяся накопителем электроэнергии.

Однако эта слабость может также стать сильной стороной водородных ТЭ: утилизированное от них отработанное тепло может быть использовано для обогрева КТС. К сожалению, из высоких потерь реальная энергоэффективность современной водородной топливной системы всего в 29—32 % немногим лучше, чем бензиновая (22 %) или дизельная (25 %). Но даже электромобиль лишь незначительно лучше, чем автомобиль на ТЭ, когда речь идет о цепочке получения электроэнергии — использования на ведущих колесах.

Аккумуляторы электромобилей более эффективны, но требуют гораздо большего предложения свободной электроэнергии. Максимилиан Фихтнер, профессор химии твердого тела Ульмского университета, подсчитал, что для перевозок обычными и гибридными автомобилями в Германии годовая потребность в электроэнергии составляет около 770 ТВт·ч. Для топливно-водородных электромобилей из-за их сниженной энергоэффективности эта потребность составит уже 1000 ТВт·ч. Общий вывод таков: электромобиль в несколько раз эффективнее, поскольку чисто электрический парк с КТС с аккумуляторной батареей потребует потребления около 200 ТВт·ч электроэнергии в год.

Эти энергетические трансформации подвижного состава автомобильных КТС приводят к изменению структуры транспортной мобильности. С позиций реализации природоохранной стратегии мирового сообщества, вообще, и соблюдения требований и рекомендаций Парижского Соглашения по климату, в частности, в аналитическом обзоре специалистов Международного энергетического агентства рассматриваются [5] условия обеспечения параметров намеченных экологических и энергетических целей электрификации. С одной стороны, их реализация жизненно необходима для предотвращения опасности интенсивного протекания процесса глобального потепления, связанной с выбросами парниковых газов, а с другой стороны, является основой надежного энергоснабжения.

На этом пути уже достигнуты несомненные успехи. Так, при удвоении количества потребляемой электроэнергии по сравнению с 2010 г. количество генерируемой электроэнергии в 2018 г. не так резко, но все-таки в Германии выросло на 7 %, или 450 ТВт·ч до 26 700 ТВт·ч. Около 25 %, или 6000 ТВт·ч ее прибавки получено на электростанциях и 90 ТВт·ч — на также неэмиссионных атомных электростанциях, а выбросы вредных веществ — всего на 1,7 %. Для удовлетворения потребностей



**Рис. 2. Промышленная электростанция**

массовой электрификации остро необходимы дополнительные более 1000 ТВт·ч электроэнергии.

Однако, с учетом того что интенсивные поиски реализаций экологических технологий природоохранной стратегии Евросоюза, ставящей целью ежегодное снижение выбросов токсичных и парниковых газов на 5 %, малоэффективны без остального мира (эти выбросы всей Европы составляют всего половину, того, что эмитируют США, Китай и Индия), важно присоединение к Парижскому Соглашению всех стран мира.

Тем не менее нельзя умалить успешность немецкого энергогенерирующего сектора экономики Германии, добившегося за счет снижения доли ископаемых источников энергии в виде угля, нефтепродуктов и газа уменьшения удельных выбросов углекислого газа в атмосферу электростанциями до 474 г/кВт·ч (в 2010 г. — более 600 г/кВт·ч). С увеличением доли в их энергоснабжении ветрового и солнечного возобновляемых источников этот показатель может быть еще более улучшен. По оптимистичному прогнозу, в 2030 г. эта доля должна и может быть увеличена до 65 %.

Повышение функциональности и энергоэффективности эксплуатации электрифицированных КТС достигается при целевой установке на конечный результат. Правильность и достоверность этого вывода подтверждаются [6] результатами анализа действенности системного подхода к оптимизации гибридного, в частности, привода КТС

с комбинированной энергетической установкой. В аналитическом исследовании сотрудников энергомашиностроительного подразделения немецкого Унтергруппенбаха транснациональной автокомпонентной корпорации Magna со штаб-квартирой в США оценивается продуктивность совершенствования как отдельных силовых агрегатов комбинированных силовых установок автомобильных КТС в составе ДВС, электромашины с функциями электродвигателя и генератора и объединяющей их трансмиссией, так и всего комплектного привода.

В качестве оцениваемой комбинированной энергетической установки рассматривается так называемый последовательный гибрид в вариантах исполнения с тепловыми и электрическими силовыми, в том числе высоковольтными, агрегатами в обычной бортовой сети электропитания и 48-вольтовой. Их энергоэффективность и экологичность Magna Powertrain верифицировала по результатам виртуальных исследований по методике Всемирной гармонизированной испытательной процедуры WLTP. Благодаря такой конструктивно-технологической архитектуре энергоэффективность инновационной комбинированной энергетической установки повышается на 34 %, а лимит рекуперлируемой тормозной энергии — до 90 кВт.

Наряду с дороговизной и неразвитостью электрозарядной инфраструктуры, главным ограничителем массового применения на автомобильных дорогах общего пользования электромобилей продолжает оставаться относительно небольшой реальный запас автономного хода. Проведенный в Университете Эрлангена-Нюрнберга (Германия) комплексный анализ потенциала запаса автоном-



**Рис. 3. Последовательный гибридный привод электрифицированного КТС**

ного хода электрифицированного КТС основан [7] на оценке возможностей улучшения энергоемких возможностей и способностей аккумуляторных батарей, ТЭ и динамики их зарядки и заправки за счет совершенствования соответствующих технологий.

Для преодоления этого мощного сдерживающего фактора электромобилизации предпринимаются разные меры конструкторско-технологических воздействий, среди которых лидируют усовершенствованные энергоаккумуляторные системы, их постоянная подпитка передачей энергии по релейным сетям, индуктивным способом и применение водородной топливной энергетики. Всесторонняя комплексная оценка их эффективности позволила проранжировать вклад каждой в решение этой актуальной проблемы.

Выяснилось, что, несмотря на отсутствие, на первый взгляд, кардинальных изменений, по сравнению с легковыми автомобилями, в сегменте грузовых автомобилей, особенно тяжелых, увеличилась доля аккумуляторного подвижного состава и на водородных ТЭ, что привело к более существенному, чем у легковых автомобилей, снижению удельной стоимости эксплуатации, увеличению пробега. А на них, как раз, и приходится большая абсолютная часть выбросов вредных веществ.

Однако лидерами мирового автомобилестроения значительные усилия для решения этой проблемы прилагаются и в сегменте легковых автомобилей и развозных фургонов. Ярким примером тому может служить концепция комплексной, в том числе и экологической, безопасности легкового автомобиля Mercedes-Benz GLC F-Cell. Он представляет собой [8] особый гибрид, оснащенный бортовым компьютером, электронными системами активной и пассивной безопасности, а также системами электродвигателем (помимо ДВС), водородным ТЭ и аккумуляторной батареей, подзаряжается в процессе реализующего транспортный процесс движения энергией рекуперативного торможения с помощью независимого компилируемого программного модуля.

Таким образом, система ТЭ, водородные резервуары, аккумуляторная батарея, электрические и электронные компоненты бортовой сети в рамках фирменной концепции немецкого концерна Daimler надежно защищаются от перегрузок за счет отслеживания фактических параметрических характеристик функционирования агрегатов и систем, сравниваемых с эталонными значениями, позволяя выявлять ошибки по отклонениям от стандартизированных и критических аварийных нагрузок.

Не только не забыты, но, наоборот, в центре внимания процесса электромобилизации находятся и спортивные автомобили. При разработке спортивных электромобилей акцент инженерами немецкого автомобилестроительного концерна Audi, например, был сделан [9] на оптимизации динамики разгона. Как первый разработчик оригинального полного привода quattro еще 40 лет назад, Audi теперь снова реализовал эту концепцию уже на внедорожном электромобиле модели e-tron с мощностью привода до 300 кВт, в том числе 220 кВт — рекуперативной. По сравнению с концепцией полного привода легкового автомобиля Audi R8 V10 quattro концепция Ur-quattro отличается уменьшенной избыточной и недостаточной поворачиваемостью даже на заснеженном дорожном покрытии.

Электропривод на автотранспорте присутствует [10] не только в городах, но и электрифицированных коммерческих автомобильных КТС — автобусах и даже тяжелых грузовых автомобилях. В частности, электромобильная концепция помогла концерну Deutsche Post/DHL не только улучшить экологическую ситуацию в густонаселенных мегаполисах, но и сократить эксплуатационные расходы своего автопарка, в том числе от 60 до 70 % — на топливо.

Наряду с легковыми электромобилями европейских производителей, электрифицированным приводом в грузовых автомобилях уже активно заинтересовались немецкие концерны Daimler с тягачом Mercedes-Benz eActros с пробегом на электротяге в 170 км, MAN и шведский Volvo (по 200 км). Массовое внедрение чистого электротранспорта сдерживается ограничениями запаса автономного хода из-за недостаточной энергоемкости аккумуляторных батарей и продолжительной их зарядкой. Оптимизм вселяет успешность решения этих проблем опытного североамериканского легкового автомобиля Tesla Semi с литий-ионной аккумуляторной батареей энергоемкостью более 1000 кВт·ч, обеспечивающей запас хода 640—800 км с зарядкой до 80 % емкости всего за 30 мин.

А темпы распространения электромобилизации наглядно просматриваются [11] на примере ее азиатской реализации. Наряду с самым обширным китайским рынком потребления электромобилей (600 тыс. ед. приобретенных в 2017 г., что на 74 % больше, чем в 2016 г., и составляет половину купленных во всем мире) и японским с более консервативными предпочтениями пользователей, с одновременным массовым предложением

китайскими и японскими автопроизводителями электрифицированных КТС, самой массовой из которых является модель Emgrand EV300 V электроавтомобиля автомобильной компании Geely из китайского Ханчжоу, вторым по спросу в Азии является юго-восточный регион.

На основе анализа покупательской способности по оценке размера официальной зарплаты работающих в странах Ассоциации государств Юго-Восточной Азии (Бруней, Малайзия, Мьянма, Филиппины, Сингапур, Таиланд и Вьетнам), составляющей в среднем 384 долл. США (уровень Таиланда) и колеблющейся в широких пределах от 270 долл. для рабочего персонала до 2600 долл. для инженерного состава во Вьетнаме, консалтинговым агентством Germany Trade & Invest проведен прогноз спроса на приобретение новых электроавтомобилей, ориентирующий немецких автомобилестроителей на выпуск КТС в этой производственной нише. Согласно этому прогнозу в среднем по странам Юго-Восточной Азии более чем каждый третий (37 %) потенциальный покупатель готов приобрести электроавтомобиль. В Сингапуре — 23 %, во Вьетнаме — 33 %, в Малайзии — 37 %, в Индонезии — 41 %, в Таиланде — 44 %, в Филиппинах — 46 %.

Это лишь некоторые примеры реализации программы электроавтомобилизации, не так уж гладко осуществляемой с мощной государственной поддержкой в Германии с буксующими планами вывода на дороги общего пользования 1 млн электрифицированных КТС и Франции с еще более амбициозными планами (2 млн ед.). Но актуальные реалии действительной ситуации не только скорректировали эти радужные планы, но и обозначили [12] негативные последствия процесса реализации Национальной программы электроавтомобилизации Германии.

В частности, руководителями авторизованного поставщика традиционных силовых агрегатов — ДВС и трансмиссий легковых автомобилей торговой марки Passat немецкого автомобилестроительного концерна Volkswagen в виде серьезных опасений выражаются мнения относительно глобальной трансформации, в первую очередь — для Германии, всего обслуживающего автомобильную промышленность машиностроительного комплекса, связанной с переходом с механических приводов на электрифицированные гибридные и чисто электрические.

Наряду со снижением материалоемкости и количества комплектующих электроприводов и заменой технологий металлообработки (точение, фрезерование, хонингование и шлифование) на комбинированные формирующие, полупроводниковые и электрохимические, связанные с генерированием,

аккумуляцией и отдачей потребителям электроэнергии, это всеобщее глубокое преобразование приведет к ускоренной автоматизации роботизированного производства, реально оборачивающееся как резким ростом производительности труда, так и значительным высвобождением рабочей силы.

Первое означает, что та же численность работающих вместо 350 ед. ДВС с 2000 комплектующими сможет выпускать 1600 электроприводов с менее чем 200 комплектующими. Второе — то, что в связи с переходом от выпуска комплектующих и полнокомплектных бензиновых и дизельных ДВС на агрегаты и силовую электронику только в федеральной земле Нижняя Саксония (Германия) в самое ближайшее время прогнозируется высвобождение 120 тыс. занятых на этих профильных производствах.

Несмотря на все эти и другие вызовы и трудности, для решения глобальной природоохранной проблемы сохранения жизни на Земле человечество не может уже отказаться от магистрального пути преобразования транспортного комплекса, как и всей производственной сферы деятельности. И выходы из сложных ситуаций будут искаяться и находиться.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Alternative** Kraftstoffe für Lkw. Hrden berwinden — Chancen für "Grüne Lkw" nutzen // ew: Elektrizitätswirt. — 2019. — Vol. 118, № 4. — P. 12—13.
2. **Hemmer S., Walters M., Tinz S.** Skalierbare Brennstoffzellensysteme für Nutzfahrzeuge // MTZ: Motortechn. Zeitschrift. — 2019. — Vol. 80, № 7. — P. 72—79.
3. **Schick N.** Referenz-Brennstoffzellen-system für Elektrofahrzeuge // MTZ: Motortechn. Zeitschrift. — 2019. — Vol. 80, № 11. — P. 100—104.
4. **Noch hat** die Brennstoffzelle ein Reichweitenproblem // MTZ: Motortechn. Z. — 2019. — Vol. 80, № 11. — P. 6—7.
5. **Quo vadis**, Mobilitätswende // MTZ: Motortechn. Zeitschrift. — 2019. — Vol. 80, № 11. — P. 10—15.
6. **Systemansatz** für einen dedizierten Hybridantrieb // ATZ: Automobiltechn. Zeitschrift. — 2019. — Vol. 80, № 7—8. — P. 66—71.
7. **Franke J., Weigelt M., Bican P. M., Batz K.** Analyse der Reichweitenpotenziale elektrischer Fahrzeugantriebe // ATZ: Automobiltechnische Zeitschrift. — 2019. — Vol. 121, № 5. — P. 84—85, 88.
8. **Justen R., Hermie M., Schöneburg R., Hellmuth T. W.** Das Sicherheitskonzept des Mercedes-Benz GLC F-Cell // ATZ: Automobiltechn. Zeitschrift. — 2019. — Vol. 121, № 3. — P. 72—75.
9. **Der elektrische** Allradantrieb des Audi e-tron // ATZ: Automobiltechn. Zeitschrift. — 2019. — Vol. 121, № 6. — P. 16—21.
10. **Burkert A.** Elektroantrieb im Nutzfahrzeug // MTZ: Motortechn. Z. — 2019. — Vol. 80, № 6. — P. 6—7.
11. **Die Asean-Staaten wagen** die Elektromobilität // MTZ: Motortechn. Zeitschrift. — 2019. — Vol. 80, № 2. — P. 11—12.
12. **Burkert A.** Die Elektromobilität krepelt Deutschland um // ATZ extra. — 2019, Прил. Elektromobilität. — P. 15—20.

Д. А. Морозов, канд. техн. наук, e-mail: dimol9@mail.ru,  
С. В. Хмельницкий, канд. техн. наук, В. А. Ковалев, канд. техн. наук,  
П. Г. Руденко, асп., Сибирский Федеральный Университет, г. Красноярск

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДТП ПРИ НАЕЗДЕ АВТОМОБИЛЯ НА СТАТИЧНОЕ ПРЕПЯТСТВИЕ

*В работе предложена модель дорожно-транспортного происшествия при наезде автомобиля на локальный дорожный подъем, которая позволяет произвести расчет скорости на момент наезда с учетом параметров последующего перемещения транспортного средства и его механического взаимодействия в результате перемещения с неподвижным препятствием. Предложенная модель позволяет учесть затраты кинетической энергии автомобиля на последующее перемещение и механическую работу деформации неподвижного препятствия.*

**Ключевые слова:** дорожно-транспортное происшествие, наезд на локальное препятствие, перемещение транспортного средства по воздуху, механическая деформация неподвижного препятствия.

*The paper proposes a model of a traffic accident when a car hits a local road lift, which allows calculating the speed at the time of collision, taking into account the parameters of the subsequent movement of the vehicle and its mechanical interaction as a result of moving with a fixed obstacle. The proposed model allows you to take into account the cost of the kinetic energy of the car for the subsequent movement and mechanical work of the deformation of a stationary obstacle.*

**Keywords:** traffic accident, collision with a local obstacle, moving a vehicle through the air, mechanical deformation of a fixed obstacle.

**Цель статьи.** Разработать модель дорожно-транспортного происшествия, произошедшего в результате наезда автомобиля на локальный дорожный подъем, для расчета скорости транспортного средства на момент наезда с учетом затрат кинетической энергии на последующее перемещение и механическую работу деформации неподвижного препятствия, что позволит получить достоверные данные и материалы для дальнейшего объективного рассмотрения дорожно-транспортного происшествия.

**Постановка проблемы.** В качестве исходных данных для разработки модели примем следующие условия и значения: дорожно-транспортное происшествие, произошедшее при наезде автомобиля на локальный дорожный подъем (земляной холм), приведший его к дальнейшему перемещению по воздуху и столкновению с электрической опорой на пути перемещения транспортного средства.

Покрытие проезжей части гравийное; состояние проезжей части — сухой гравий.

Вес автомобиля в снаряженном состоянии — 1300 кг. Загруженность — 3 чел.

Требуется определить скорость автомобиля на момент наезда на земляной холм с учетом поднятия транспортного средства на высоту 3 м с од-

новременным перемещением по воздуху на расстояние 16,4 м, столкновением с электрической опорой на пути перемещения и ее разрушением.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Практические и теоретические аспекты определения параметров движения транспортного средства на момент столкновения рассмотрены в работах многих отечественных (Евтюков С. А., Рябчинский А. И., Суворов Ю. Б., Боровских Б. Е.) и зарубежных авторов (R. Byatt, R. Watts, Christopher J. L. Murray, Collins J. C., Morris J. L.). Это является первоочередной задачей при расследовании причин дорожно-транспортных происшествий (ДТП). Существует большое количество объективных и субъективных параметров, которые находятся в причинно-следственной связи с ДТП. Поэтому стандартные подходы нередко не позволяют достоверно реконструировать процесс ДТП, что и обусловило необходимость в разработке математической модели для данного конкретного случая.

**Изложение основного материала.** В процессе реконструкции дорожно-транспортного происшествия (ДТП) существующие методы зачастую не позволяют получить необходимые результаты вследствие отсутствия в исходных данных параметров, требуемых для расчета. Одним из таких па-

раметров является скорость транспортного средства в момент инцидента. По величине скорости устанавливают причинно-следственные связи, обуславливающие ДТП. Например, скорость движения необходима для восстановления взаимного расположения транспортных средств на момент возникновения опасности, т. е. решения вопроса о возможности водителя путем применения экстренного торможения предотвратить ДТП.

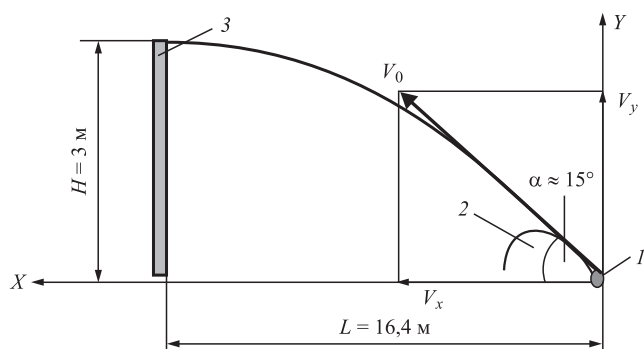
Скорость транспортных средств на момент столкновения в существующих методиках определяют по следу тормозного пути [1–8], разлету осколков стекол, оценке со слов очевидцев. Однако во многих случаях данные методы неприменимы из-за отсутствия исходных данных: при столкновении без торможения следы отсутствуют; схемы дорожно-транспортных происшествий иногда составляются не вполне корректно и пр. Оценка свидетелями скорости транспортного средства весьма приближительна. В этих случаях могут быть применены модели, основанные на динамике физических процессов, происходящих при ДТП. К отдельному классу можно отнести модели, основанные на соотношении кинетической энергии и выполненной работы в процессе развития ДТП.

Для решения первой части задачи составим схему движения автомобиля как движение материального объекта в вертикальной плоскости (рис. 1).

Составим уравнение движения материального объекта

$$Y = Y_0 + V_y t - \frac{gt^2}{2}, \quad (1)$$

где  $Y$  — текущее значение ординаты;  $Y_0$  — начальная координата объекта,  $Y_0 = 0$ ;  $V_y$  — скорость тела в вертикальной плоскости, м/с;  $V_y = V_0 \sin \alpha$ ;



**Рис. 1. Схема движения материального объекта:**

1 — материальный объект; 2 — земляной холм; 3 — электрическая опора;  $X$  — продольное перемещение объекта;  $Y$  — вертикальное перемещение объекта;  $H$  — высота удара

$V_x = V_0 \cos \alpha$ ;  $\alpha$  — угол направления движения тела относительно оси  $x$ ;  $g = 9,8$  м/с;  $t$  — текущее время, с.

При  $Y = H$ ,  $X = L$ , где  $H$  — высота подъема тела в вертикальной плоскости, м;  $X$  — абсцисса положения тела;  $L$  — продольное перемещение тела относительно оси  $x$ .

$$X = V_x t \quad (2)$$

или

$$L = V_0 t \cos \alpha, \quad (3)$$

где  $V_0$  — начальная скорость тела, м/с.

Откуда

$$t = \frac{L}{V_0 \cos \alpha}. \quad (4)$$

Тогда уравнение (1) примет вид

$$H = V_0 \sin \alpha \frac{L}{V_0 \cos \alpha} - \frac{gL^2}{2V_0^2 \cos^2 \alpha} \quad (5)$$

или

$$H = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} L - \frac{gL^2}{2V_0^2 \cos^2 \alpha}, \quad (6)$$

или

$$\frac{gL^2}{2V_0^2 \cos^2 \alpha} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} L - H. \quad (7)$$

Откуда

$$V_0 = \sqrt{\frac{L^2 g}{2 \cos^2 \alpha \left( \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} L - H \right)}}, \quad (8)$$

где

$$V_0 = \sqrt{\frac{16,4^2 \cdot 9,8}{2 \cos^2 15 \left( \frac{\sin 15}{\cos 15} \cdot 16,4 - 3 \right)}} = 31,8 \text{ м/с или } 114,4 \text{ км/ч.}$$

**Вывод.** Скорость автомобиля на момент наезда на земляной холм, чтобы подняться на высоту 3 м и пролететь по воздуху расстояние 16,4 м, составляет 114,4 км/ч.

Для решения второй части задачи рассчитаем потери скорости автомобиля, связанные с работой на изгиб деревянной опоры электрического столба.

Величина изгибающего момента деревянной опоры [9]

$$M_{\text{ист}} = \sigma_{\text{и}} W k_{\text{д}}, \quad (9)$$

где  $\sigma_{и}$  — предельное напряжение при изгибе, для древесины (сосна)  $\sigma_{и} = 775\text{—}875 \text{ кг/см}^2$  [10];  $W$  — момент сопротивления изгибу,  $\text{см}^3$ ;  $k_d$  — коэффициент динамичности,

$$W \approx 0,1d^3, \quad (10)$$

где  $d$  — диаметр столба опоры,  $d = 25 \text{ см}$ , тогда

$$W \approx 0,1 \cdot 25^3 = 1562,5 \text{ см}^3,$$

где

$$k_d = \frac{\delta_d}{\delta_{ст}}, \quad (11)$$

где  $\delta_{ст}$  — деформация упругого элемента при статическом приложении нагрузки (при постепенном увеличении нагрузки от нуля до ее конечного значения);  $\delta_d$  — деформация при ударном приложении нагрузки.

При определении коэффициента динамичности исходят из того, что связь между нагрузками и деформациями сохраняется одинаковой как при статической  $P_{ст}$ , так и при динамической  $P_d$  нагрузках, т. е.

$$\delta_{ст} = \frac{P_{ст}}{c}; \quad (12)$$

$$\delta_d = \frac{P_d}{c}, \quad (13)$$

где  $c$  — жесткость материала столба,  $\text{кг/м}$ ,

$$c = \frac{GF}{V}, \quad (14)$$

где  $G$  — модуль упругости при сдвиге,  $\text{кг/см}^2$ ;  $F$  — площадь поперечного сечения столба,  $\text{см}^2$ ;  $V$  — величина сдвига в направлении действия нагрузки (см. рис. 2).

Поскольку

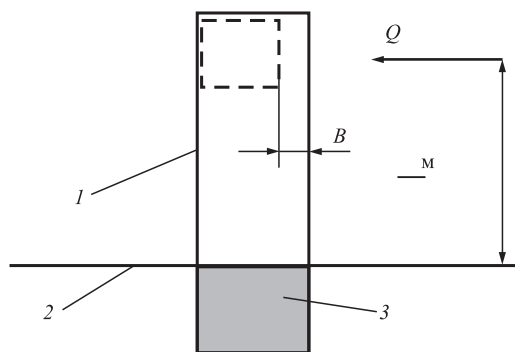
$$c = \frac{3EJ_x}{l_x^3}, \quad (15)$$

где  $E$  — модуль упругости первого рода,  $\text{кг/см}^2$ ;  $J_x$  — осевой момент инерции,  $\text{см}^4$ ;  $l_x$  — высота приложения силы  $Q$ , то, с учетом выражения (14), получим величину сдвига

$$V = \frac{l_x^3 GF}{3EJ_x}, \quad (16)$$

Так как

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}, \quad (17)$$



**Рис. 2. Схема приложения нагрузки  $Q$ :**

1 — столб электрической опоры; 2 — граница между верхней и нижней частью столба; 3 — нижняя часть столба, вкопанная в землю;  $B$  — величина сдвига

где  $\mu$  — коэффициент поперечной деформации, или коэффициент Пуассона.

Тогда выражение (16) примет вид

$$V = \frac{l_x^3 F}{6(1+\mu)J_x}. \quad (18)$$

Потенциальная энергия деформации столба, накопленная при ударе, может быть выражена формулой

$$W_{п} = \frac{P_d \delta_d}{2}. \quad (19)$$

С учетом выражения (13), имеем

$$W_{п} = \frac{\delta_d^2 c}{2}, \quad (20)$$

где  $W_{п}$  — потенциальная энергия деформации столба, Дж.

На основании закона сохранения энергии имеем

$$W_{ка} = W_{п}, \quad (21)$$

где  $W_{ка}$  — кинетическая энергия удара, Дж.

Тогда

$$W_{ка} = \frac{m_a V_a^2}{2}, \quad (22)$$

где  $m_a$  — масса автомобиля,  $m_a = 152,5 \text{ кг}$ ;  $V_a$  — скорость автомобиля,  $\text{м/с}$ .

Тогда из выражения (21) с учетом выражения (22), получим

$$\delta_d = V_a \sqrt{\frac{m_a}{c}}. \quad (23)$$

С учетом выражения (11), получим

$$V_a \sqrt{\frac{m_a}{c}} = k_d \delta_{ст}. \quad (24)$$

Откуда

$$K_d = 1 + \frac{V_a}{\delta_{ст}} \sqrt{\frac{m_a}{c}}. \quad (25)$$

Учитывая, что основание опоры находится в земле, то, с учетом деформации земли и малого значения "в" в выражении (14), правой частью выражения (25) можно пренебречь.

Тогда

$$\begin{aligned} M_{ист} &= 875 \cdot 1562,5 = \\ &= 1\,367\,187,5 \text{ кг} \cdot \text{см}, \text{ или } 13\,671,9 \text{ кг} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

Потери скорости на изгиб деревянной опоры составят

$$\Delta V = \sqrt{\frac{2M_{ист}}{m_a}}. \quad (26)$$

Тогда

$$\Delta V = \sqrt{\frac{2 \cdot 13\,671,9}{152,5}} = 13,4 \text{ м/с}, \text{ или } 48,2 \text{ км/ч}.$$

С учетом потерь  $\Delta V$  скорости на изгиб деревянной опоры скорость автомобиля на момент наезда на земляной холм составит

$$V_a = V + \Delta V, \quad (27)$$

где

$$V_a = 31,8 + 13,4 = 45,2 \text{ м/с}, \text{ или } 162,7 \text{ км/ч}.$$

Вывод. Скорость автомобиля на момент наезда на земляной холм, чтобы подняться на высоту 3 м, пролететь по воздуху расстояние 16,4 м и совершить работу на изгиб деревянной опоры электрического столба, составляет 162,7 км/ч.

**Выводы.** Предложенная модель дорожно-транспортного происшествия при наезде автомобиля на статичное препятствие позволяет более детально изучить обстоятельства происшествия, выявить и систематизировать факторы, способствующие его возникновению и развитию, получить данные, которые могут быть доказательными для установления истины по гражданскому или уголовному делу.

Известные методы моделирования динамики движения транспортного средства базируются либо на визуальном восприятии очевидца события [11], либо на материалах проведенного дорожного эксперимента [12]. В первом случае достоверность освещения события определяется психофизическими возможностями человека [13], во

втором случае смоделировать событие осложняется разными технико-эксплуатационными свойствами транспортных средств, используемых в испытании и участвующих в ДТП [14]. По этой причине построение модели происшествия только на законах физики [15] является адекватным и приоритетным.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Байэтт Р., Уотс Р.** Расследование дорожно-транспортных происшествий. — М.: Транспорт, 1983. — 288 с.
2. **Евтюков С. А., Васильев Я. В.** Расследование и экспертиза дорожно-транспортных происшествий / Под общ. ред. С. А. Евтюкова. — СПб.: Издательство "ДНК", 2004. — 288 с.
3. **Евтюков С. А., Васильев Я. В.** Экспертиза дорожно-транспортных происшествий. Справочник. — СПб.: Издательство "ДНК", 2006. — 536 с.
4. **Судебно-автотехническая экспертиза:** Методическое пособие для экспертов-автотехников, следователей и судей / Под редакцией В. А. Иларионова. Ч. 2. — М.: ВНИИСЭ, 1980. — 491 с.
5. **Иларионов В. А.** Экспертиза дорожно-транспортных происшествий: Учебник для вузов. — М.: Транспорт, 1989. — 255 с.
6. **Расследование дорожно-транспортных происшествий** / под общ. ред. В. А. Федорова, Б. Я. Гаврилова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательство "Экзамен", 2003. — 464 с.
7. **Транспортно-трассологическая экспертиза** по делам о дорожно-транспортных происшествиях. Диагностическое исследование: Методическое пособие для экспертов, следователей и судей. Вып. 2. — М.: ВНИИСЭ, 1988.
8. **Yang J., Ren S., Ma Z., Wang H., Luo T.** Modeling of road traffic collision accidents' causes and experimental analysis of influential factors: Dongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban) // Journal of Southeast University (Natural Science Edition) Volume 45, Issue 5, 20 September 2015, Pages 1008—1012.
9. **Справочник** по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев: Отв. ред. Г. С. Писаренко— 2-е изд., перераб. и доп. — Киев: Наук. думка, 1988. — 736 с.
10. **Физические величины:** Справочник / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др.; под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с.
11. **Подлоцкий И. Н.** Оценка специалистом степени субъективности восприятия очевидцем характеристик внешнего облика человека: Вестник Московского университета МВД России. — 2014. — № 2. — С. 8—9.
12. **Кисляков С. В.** Совершенствование организации проведения следственного эксперимента на первоначальном этапе расследования ДТП с причинением вреда здоровью человека: Российский юридический журнал. — 2016. — № 2. — С. 108—113.
13. **Гольчевский В. Ф., Жигалов Н. Ю., Карнович С. А.** Отдельные аспекты алгоритма решения экспертной задачи определения скорости движения пешехода: Российский следователь. — 2014. — № 11. — С. 3—5.
14. **Омуров Ж. М.** Эксплуатационные свойства транспортных средств, влияющие на режим движения: Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. — 2016. — № 3. — С. 141—144.
15. **Балакин В. Д., Щипан И. В.** Реконструкция механизма дорожно-транспортного происшествия со столкновением легковых автомобилей: Вестник СибАДИ. — 2014. — № 36. — С. 7—12.

Технический редактор *Е. М. Патрушева*. Корректор *Е. В. Комиссарова*

Сдано в набор 03.09.2020. Подписано в печать 19.10.2020. Формат 60 × 88 1/8. Усл. печ. л. 5,88.

Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.

Оригинал-макет: ООО "Авансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: [www.aov.ru](http://www.aov.ru)