

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

**ТРАНСПОРТ И ТРАНСПОРТНЫЕ  
СИСТЕМЫ:**  
конструирование, эксплуатация, технологии

Сборник научных статей

Основан в 2018 году

Выпуск 3

Минск  
БНТУ  
2021

УДК [656+625](082)  
ББК 39я43  
Т65

**Адрес редакции:** 220027, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Я. Коласа, 12  
Тел.: +375173310548 **E-mail:** d.kapsky@gmail.com  
**Web:** avto\_traktor\_bud@bntu.by

При цитировании материалов сборника ссылка обязательна. Перепечатка материалов допускается только по согласованию с редакцией и авторами.

Статьи данного выпуска содержат материалы теоретических и экспериментальных исследований автомобилей, тракторов и их двигателей. Рассматриваются вопросы эксплуатации и ремонта автомобильной техники, безопасности дорожного движения. Значительное место уделяется методике подготовки специалистов в сфере транспорта.

Сборник рассчитан на инженерно-технических работников заводов и научно-исследовательских лабораторий, преподавателей и аспирантов вузов.

Сборник включен в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам.

Публикуемые материалы рецензируются.

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Главный редактор – Сергей Васильевич Харитончик.**

*Зам. главного редактора – Д.В. Капский, (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь).*

*Технический секретарь – С.В. Богданович, (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь).*

### **Члены редакционной коллегии:**

*Л. Аартс (Институт исследований безопасности дорожного движения, Гаага, Нидерланды),*

*Б. Бекер (Дрезденский Институт автомобильных технологий, Дрезден, Германия),*

*В. П. Бойков (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),*

*В. Ванцевич (Алабамский университет в Бермингеме, Бермингем, США),*

*С. Гаца (Краковская политехника, Краков, Польша),*

*В. В. Гаевский (Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Российская Федерация),*

*А. К. Головнич (Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Республика Беларусь),*

*В. Иванов (Технический университет, Ильменау, Германия),*

*В. С. Ивашко (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),*

*Р. Б. Ивуть, (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),*

*И. В. Кабашкин (Институт транспорта и связи, Рига, Латвия),*

*В. А. Коробкин (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),*

*Г. М. Кухаренок (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),*

*А. Лаврешин (Лундский университет, Лунд, Швеция),*

*О. Н. Ларин (Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Российская Федерация),*

*А. О. Лобашов (Харьковский национальный университет городского хозяйства им. О.Н. Бекетова, Харьков, Украина),*

*Э. Морис (университет Лафборо, Лафборо, Великобритания),*

*П. Л. Мариев (ГНУ «Объединенный институт машиностроения. Минск, Республика Беларусь),*  
*П. А. Пегин (Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, Санкт-Петербург, Российская Федерация),*  
*Л. Персия (Римский институт Ла Сапиенца, Рим, Италия),*  
*В. П. Полищук (Национальный транспортный университет, Киев, Украина),*  
*И. Н. Пугачев (Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Российская Федерация),*  
*С. А. Рынкевич, (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),*  
*А. И. Рябчинский (Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Российская Федерация),*  
*И. С. Сазонов (Белорусско-российский университет, Могилев, Республика Беларусь),*  
*А. В. Сараев (Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков, Украина),*  
*А. Т. Скойбеда, (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),*  
*Л. Цъевек (ООО «Knorr-Bremse», Будапешт, Венгрия),*  
*М. Хириц (Грацский технический университет, Грац, Австрия),*  
*А. В. Шмелев (ГНУ «Объединенный институт машиностроения. Минск, Республика Беларусь),*  
*А. Г. Шумилин (Государственный комитет по науке и технологиям Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь),*  
*Д. Яннис (Национальный технический университет Афин, Афины, Греция).*

## Оглавление

<i>Капский Д. В., Богданович С. В., Волинец А. С.</i> Внедрение современных подходов к безопасности дорожного движения в Республике Беларусь. Необходимость подготовительного периода.....	7
<i>Карабаев Н. А., Бойков В. П.</i> Развитие грузовых автомобильных перевозок на фоне пандемии COVID-19.....	23
<i>Карабаев Н. А.</i> Оптимизация грузовых перевозок с учетом остаточных ресурсов транспортных средств.....	39
<i>Сонич О. А., Сидоров С. А., Дрозд И. А.</i> Анализ нагруженности трансмиссии полноприводного трактора тягового класса 3 при моделировании преодоления препятствий с плугом.....	53
<i>Кухаренок Г. М., Предко А. В.</i> Оценка параметров впускных каналов шестицилиндровых двигателей производства минского моторного завода.....	64
<i>Рынкевич С. А.</i> Управление и диагностирование гидрофицированных трансмиссий: состояние проблемы и перспективы развития.....	77
<i>Бажинев А. В., Кравцов М. Н., Бажинова Т. А.</i> Показатели безопасности и качества автомобильного транспорта.....	89
<i>Таяновский Г. А., Басалай Г. А.</i> Структура алгоритма управления ступенчатой трансмиссией горной машины .....	103
<i>Поварехо А. С.</i> Функциональные характеристики тормозной системы полноприводного трактора.....	112
<i>Бойков В. П., Поздняков Н. А., Ковалев П. В.</i> Обоснование расчетной схемы статической и динамической устойчивости подъемного оборудования на базе автомобильного шасси.....	123
<i>Бойков В. П., Поздняков Н. А., Ковалев П. В.</i> Расчет показателей (критериев) статической и динамической устойчивости подъемного оборудования на базе автомобильного шасси.....	131
<i>Семенов И. Н.</i> Применение импульсного метода в диагностировании легковых автомобилей.....	141

<i>Михальцевич Н. Р.</i> Градиентный способ регулирования работы систем АБС для двухколесных одноколейных транспортных средств.....	151
<i>Исаченков В. С., Клоков Д. В., Лешкевич А. Ю., Леонов Е. А.</i> Математическая модель колесной машины с комбинированным технологическим оборудованием для перемещения длинномерных грузов.....	163
<i>Семченков С. С., Капский Д. В.</i> Повышение эффективности работы маршрутного пассажирского транспорта применением секторального метода.....	170

## **ВНЕДРЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ. НЕОБХОДИМОСТЬ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОГО ПЕРИОДА**

*Капский Д. В.*<sup>1</sup>, д-р техн. наук, доц.,

*Богданович С. В.*<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц., *Вольнец А. С.*<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, г. Минск,  
Республика Беларусь,

e-mail: *d.kapsky@gmail.com, bsw001@gmail.com*

<sup>2</sup>Государственное предприятие «БелдорНИИ»,

г. Минск, Республика Беларусь,

e-mail: *briefly.g@gmail.com*

## **THE INTRODUCTION OF MODERN APPROACHES TO ROAD SAFETY IN THE REPUBLIC OF BELARUS. THE NEED FOR A PREPARATORY PERIOD**

*D. Kapsky*<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, Associate  
Professor, *S. Bogdanovich*<sup>1</sup>, Ph.D. in Engineering, Associate  
Professor, *A. Volynets*<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus,

e-mail: *d.kapsky@gmail.com, bsw001@gmail.com*

<sup>2</sup>State Enterprise "BeldorNII", Minsk, Belarus,

e-mail: *briefly.g@gmail.com*

*Современные подходы к обеспечению безопасности дорожного движения, такие, как «Vision Zero», являются чрезвычайно привлекательными для применения во многих странах. Это можно объяснить тем, что правительства будут получать положительный имидж от внедрения подходов, имеющих гуманистическую направленность. Однако не все правительства задумываются над тем, что применение современной политик в области безопасности дви-*

жения требует постоянной затраты финансовых средств. Несмотря на простые и понятные принципы современных подходов, одного постановления правительства недостаточно для того, чтобы они начали работать. В условиях существенных финансовых ограничений, свойственных развивающимся странам, экономические соображения почти всегда преобладают над принципами концепций обеспечения безопасности. Это этические принципы, особенности человека, всеобщая ответственность, научные данные, а также взаимодействие и взаимозависимость всех составляющих дорожно-транспортной системы.

В нашем обществе эти принципы сегодня не находят необходимого понимания. По этой причине, если мы сегодня начнем применять «Vision Zero» у себя, существенных результатов мы не получим.

Анализ ситуации в нашей стране и изучение опыта других странах, которые уже длительное время внедряют у себя системы безопасности дорожного движения, позволяет нам говорить о том, что требуется переходный период до внедрения современной концепции безопасности движения. В этот период следует проводить программу в средствах массовой информации, направленную на изменение отношения общества к проблемам дорожных аварий. Проектировщикам дорог следует внедрять новые концепции проектирования, такие как «дорога, прощающая ошибки» или «самопоясняющая» дорога.

Ключевые слова: безопасность дорожного движения, Vision Zero, проблемы внедрения Vision Zero, Республика Беларусь, дорожная инфраструктура, скорость движения.

*Modern approaches to road safety, such as Vision Zero are extremely attractive for use in many countries. This can be explained by the fact, that governments will receive a positive image from the introduction of these approaches. However, not all governments think about the fact that the use of modern policies in the field of traffic safety requires a constant expenditure of funds. Despite the simple and understandable principles of modern approaches, a government resolution alone is not enough for them to start working. In the face of substantial financial constraints inherent in developing countries, economic considerations almost always prevail*

*over the principles of security concepts. If we start applying Vision Zero in our country today, we will not get significant results.*

*An analysis of the situation in our country and the study of the experience of other countries allow us to say that a transition period is required before the introduction of the modern concept of traffic safety. During this period, a program should be carried out in the mass media aimed at changing the attitude of society to the problems of road accidents. Road designers should implement new concepts, such as forgiving road or self-explaining road.*

*Keywords: Road safety, Vision Zero, Vision Zero Implementation Problems, Republic of Belarus, Road Infrastructure, Traffic Speed.*

## **Введение**

В Республике Беларусь до 2017 г. имело место снижение общего количество дорожных аварий и число погибших в них постоянно снижается. При этом транспортные риски в Беларуси выше, чем у стран-соседей из ЕС и существенно выше, чем в странах-лидерах в области обеспечения безопасности дорожного движения. Так, количество погибших, приходящихся на 1 млн. автомобилей в Республике Беларусь в 2 раза выше, чем в среднем по странам ЕС, и почти в 3 раза выше, чем в Швеции [1, 2].

Оставаясь в рамках традиционной для нашей страны инженерной деятельности, связанной с содержанием дорог, существенно улучшить безопасность движения уже вряд ли удастся. Является известным фактом то, что после определенного значения уровня автомобилизации достижение еще меньших значений транспортных и социальных рисков потребует перехода на качественно новые практики и механизмы обеспечения безопасности дорожного движения [3]. Поиск таких новых практик ведет к изучению мирового опыта, в первую очередь опыта стран с низкими показателями аварийности. Развитые страны разработали множество во многом схожих систем и методик, которые можно использовать как образец для внедрения в Республике Беларусь. Например, «Vision Zero», «Устойчивая безопасность» или «Безопасная система», которую пропагандирует в нашей стране Мировой Банк.

Вопрос состоит в том, поможет ли этот опыт, если попытаться применить его в Беларуси. В долгосрочной перспективе – несомненно, поможет. Однако система, подобная «Vision Zero», не является набором технических инструкций, которые можно ввести в действие приказом. Внедрение подобной системы требует применения системного подхода и изменения философии. В условиях преобладания ситуационного управления осуществлять системные преобразования очень сложно. Это свойственно большей части постсоветских стран. По этой причине требуются определенные предварительные действия, которые могут определять работы в области повышения безопасности дорожной инфраструктуры в ближайшие годы. Такие действия носят преимущественно технический характер, что не требует сложного изменения мировоззрения. Ниже приведены некоторые аргументы в поддержку такого заключения.

## **1. Существующие проблемы**

В Республике Беларусь абсолютные показатели аварийности в последние годы снижались [2]. Ориентация на абсолютные показатели привела к тому, что в последние годы внимания проблеме безопасности движения практически не уделяется. Более того, начиная с 2011 г., темпы уменьшения количества погибших замедляются. Это хорошо видно из таблицы 1.

Основные проблемы, связанные с внедрением в стране современных концепций обеспечения безопасности дорожного движения, упоминались нами ранее [2]. Все проблемы, о которых мы говорим ниже, в первую очередь касаются сети загородных дорог и деятельности дорожной администрации. Имеющиеся здесь проблемы в области безопасности дорожного движения можно разделить на несколько групп:

- этические;
- финансовые;
- институциональные;
- методологические;
- кадровые;
- технические.

Таблица 1 – Темпы изменения количества погибших в дорожных авариях на дорогах Республики Беларусь

Год	Количество погибших в дорожных авариях	Сокращение числа погибших в авариях по сравнению с прошлым годом
2011	919	
2012	772	147
2013	648	124
2014	534	114
2015	457	77
2016	403	54
2017	399	4
2018	407	-8
2019	349	58
2020	398	-49

### 1.1. Этические проблемы

Человек не является совершенным, поэтому совершает ошибки. Ошибки, совершенные на дорогах, не должны заканчиваться гибелью или тяжелыми травмами [4]. Дорожно-транспортная система должна учитывать тот факт, что человек не совершенен. Эти простые принципы лежат в основе всех современных концепций обеспечения безопасности дорожного движения.

Ответственность за безопасность разделяют как разработчики системы, так и пользователи дороги. Для них авторы Vision Zero определили в свое время следующие руководящие принципы:

1. Разработчики системы всегда, в конечном счете, несут ответственность за проектирование, эксплуатацию и использование дорожно-транспортной системы и тем самым отвечают за уровень безопасности во всей системе.

2. Пользователи дороги несут ответственность за соблюдение правил использования системы автомобильного транспорта, установленных разработчиками системы.

3. Если участники дорожного движения не соблюдают эти правила умышленно, или из-за недостатка знаний или опыта, в случае гибели и ранения людей разработчики системы должны предпринять необходимые шаги для недопущения этого в дальнейшем [5].

В Беларуси проблема состоит в том, что эти принципы не находят необходимого отклика в обществе ни на уровне этики, ни на

уровне практических действий. Это определяет существование большинства других проблем, описанных ниже.

Ответственность разработчика ограничивается выполнением минимальных требований, заложенных в стандартах. Попытки проектировщика использовать более современные решения государственной экспертизой расцениваются как необоснованное завышение цены.

Соблюдение пользователями правил использования системы автомобильного транспорта не является достаточным. Правильное отношение в обществе к соблюдению правил дорожного движения также является проблемой. Если вождение в состоянии алкогольного опьянения обществом осуждается, то превышение скорости скорее не рассматривается как серьезное нарушение. Мониторинг наиболее популярных информационных интернет-источников Беларуси показывает, что имеется значительная часть пользователей, которая не одобряет соблюдения установленных скоростных режимов другими водителями. Водители, которые соблюдают скоростной режим, часто сталкиваются на дороге с агрессивными действиями по отношению к себе со стороны других водителей.

Не действует принцип недопущения нарушения правил на дорогах страны путем совершенствования системы разработчиком. Анализ произошедших аварий и учет их причин при проектировании и эксплуатации дорог практически не проводится.

## **1.2. Финансовые проблемы**

В данном случае мы не имеем в виду недостаточное количество денежных средств. Ограниченное финансирование дорожных работ является проблемой в любой стране. Дело в том, что применение современной концепции обеспечения безопасности дорожного движения требует некоторого отхода от традиционно сложившихся способов вложения финансовых средств. Для этого необходимо изменить отношение в профессиональном сообществе. Например, если имеется два участка, на одном из которых имеются дефекты проезжей части, а на другом несколько лет подряд регулярно происходят аварии, то инженерные мероприятия практически во всех случаях будут выполняться на первом участке.

### **1.3. Институциональные проблемы**

Институциональные проблемы являются одними из наиболее серьезных. В стране не существует единого национального оператора системы безопасности дорожного движения. Соответственно, не вырабатывается единая системная политика в этой области. При этом безопасностью движения в той или иной мере занимаются почти все, в какой-либо мере связанные с автомобильным транспортом. Это владельцы автомобильных дорог, дорожная полиция, автотранспортные предприятия, автошколы, органы государственного и местного управления, некоторые общественные организации и т. д. Однако все они преследуют свои узкие цели, пытаясь достичь их методами ситуационного управления. При этом само повышение безопасности движения не является реальной государственной политикой, как это сделано, например, в странах, использующих аналог шведской программы «Vision Zero». Подсистема организации дорожного движения также не имеет своей структуры управления. Между тем мировой опыт показывает, что без решения этих вопросов у страны мало шансов на осуществление успешных мер по достижению безопасности на дорогах и достижению желаемых результатов [6].

### **1.4. Методологические проблемы**

В этой группе можно выделить следующие основные проблемы. В стране не определяются цели и задачи в области безопасности дорожного движения.

В Беларуси не внедрены многие методы и формы работы во сфере безопасности движения, повсеместно применяемые в развитых странах. Например, отсутствует национальная обсерватория безопасности дорожного движения. Не осуществляется рейтинговая оценка безопасности движения по дорогам по образцу методики IRAP. В Республике Беларусь не определены стоимости жизни и ранения людей в результате дорожных аварий для целей оценки эффективности мероприятий по организации дорожного движения и повышению его безопасности. Не проводит аудит безопасности дорожного движения и инспекция безопасности дорожного движения [1].

## 1.5. Кадровые проблемы

Недостаточное внимание к безопасности дорожного движения привело к тому, что владельцы дорог не имеют среди своих сотрудников специалистов по безопасности и организации дорожного движения. Подготовка проектировщиков в вопросах безопасности дорожного движения не является достаточной.

## 1.6. Технические проблемы

Эта группа проблем наиболее многочисленная и разнородная. Сюда мы относим недостатки применяемых теоретических положений, недостатки нормативных документов, не оптимальные технические решения. Наличие этих проблем является следствием существования проблем, описанных выше. В качестве примеров можно назвать следующее.

В Беларуси не определена и не используется функциональная классификация автомобильных дорог.

Имеются недостатки нормативной базы, о чем мы говорили ранее [2]. Наша страна остается единственной в Европе, не принявшей у себя ISO 39001.

В Беларуси не используются многие технические решения, которые показали свою эффективность во всем мире для снижения дорожных аварий. У нас не находят широкого применения кольцевые пересечения малого радиуса, пешеходные переходы в разных уровнях и другие решения. Например, вместо кольцевых пересечений используются такие спорные решения как несколько расположенных одна за другой искусственных неровностей (рисунок 1).

Вегман (Wegman) с соавторами отмечал, что человек должен быть готов принять инфраструктуру – транспортные средства, правила поведения и информационные и контрольные системы, которые могут ограничивать личную свободу – взамен на более высокий уровень безопасности. Если такой готовности принять нет, то результатом будет сопротивление со стороны человека [7]. В данном случае под человеком можно понимать и отдельного водителя автомобиля, и работника дорожной администрации, и члена правительства. Наличие названных выше проблем говорит о недостаточной готовности общества к более безопасной дорожной инфраструктуре, как бы парадоксально это ни звучало. По

этой причине, если мы сегодня начнем применять «Vision Zero» у себя, существенных результатов мы не получим. Поэтому представляется целесообразным наличие определенного переходного периода до полноценного принятия в Республике Беларусь современной концепции безопасности дорожного движения, такой, как «Vision Zero».



Рисунок 1 – Пример решения, заменяющего кольцевое пересечение малого радиуса (видны искусственные неровности, расположенные одна за другой)

## 2. Действия переходного периода

Анализ ситуации в других странах, которые уже длительное время внедряют у себя системы безопасности дорожного движения, позволяет нам предложить некоторые меры, которые следует реализовывать в переходный период. Не все эти меры можно применять, оставаясь на уровне дорожной отрасли. Успешная реализация всего комплекса действий требует наличия национального оператора системы безопасности дорожного движения и взаимодействия дорожной администрации с другими ведомствами.

*Первой мерой* является долгосрочная и широкомасштабная программа в средствах массовой информации, а также в учреждениях образования, направленная на изменение отношения общества к проблемам дорожных аварий, а также к нарушителям правил дорожного движения. Одновременно требуется ввести более жесткие штрафы за нарушения правил дорожного движения, в первую очередь за превышение скорости.

Для этого могут быть использованы методы социального маркетинга. Образование может сосредоточиться на причинах и потребностях в обеспечении безопасности на дорогах. Необходимо обучать и помогать мотивировать людей безопасно пользоваться дорожной инфраструктурой, а также предотвращать нежелательное и опасное поведение путем организации эффективной цепи сдерживания (полицейское правоприменение и наказание), особенно в переходный период [7].

*Второй мерой* является совершенствование скоростных режимов на дорогах и контроль их соблюдения. Необоснованное изменение скоростного режима приводит к резкому снижению безопасности дорожного движения при его повышении либо ухудшению условий движения транспортных средств при его снижении. Известны исследования, показывающие, что риск совершения аварии при превышении скорости в 12,8 раза выше, чем у тех, кто соблюдает установленные скорости [8].

В 2014–2016 годах на значительной части республиканских дорог Беларуси были повышены допустимые скорости движения до 120 км/ч. Однако большинство этих дорог не могут по своим характеристикам обеспечивать безопасные условия движения при повышенных скоростях. Так, геометрические параметры большинства полос разгона рассчитаны на скорость движения 90 км/ч и не позволяют транспортному средству достичь скорости 120 км/ч в пределах полосы. На автомобильных дорогах с повышенным скоростным режимом имеют место нерегулируемые пешеходные переходы в одном уровне, а также пересечения и примыкания дорог в одном уровне. Не везде решены вопросы предотвращения выхода на дорогу диких животных. Не решены вопросы, препятствующие выезду на дороги с повышенным скоростным режимом тракторов и другой, медленно движущейся сельскохозяйственной техники.

Анализ данных об аварийности показывает, что принятое решение по повышению скоростных ограничений ведет к негативным последствиям. На магистральных дорогах в Беларуси наблюдается рост количества погибших по сравнению с прошлыми годами.

Необходимо понимать, что безопасность дорожного движения на участках с повышенным скоростным режимом может быть

обеспечена только при безусловной реализации требований стандартов по обустройству дорог, созданию на них безопасной дорожной среды за счет оснащения автоматизированными системами управления движениям. Также необходимы жесткий контроль поведения участников движения и неотвратимость наказания за нарушение установленных норм и правил.

В настоящее время в Республике Беларусь достаточно широко распространена практика автоматического контроля скорости движения транспортных средств. Имеется определенный эффект точечного контроля скорости, проявляющийся в почти полном соблюдении водителями скоростных режимов в месте установки камер, однако почти весь транспортный поток увеличивает скорость сразу после окончания зоны действия камеры. Для существенного повышения эффективности контроля скорости действенной мерой является переход к контролю средней скорости движения на участке.

*Третьей мерой*, которая должна быть реализована в переходный период является оценка рисков движения по автомобильным дорогам.

Данные исследований показывают, что дорожная инфраструктура и дорожное окружение являются фактором, который способствует совершению аварии примерно в 30 % несчастных случаев, приводящих к гибели людей [9]. Дорожные условия могут быть единственным влияющим фактором в серьезных авариях, опережая превышение скорости, алкоголь и неиспользование ремней безопасности [10]. По этой причине систематическое картирование рисков и рейтинг безопасности дорог являются важным инструментом для оценки дорог. Использование методики IRAP представляется нам наиболее простым и быстрым вариантом.

*Четвертой мерой* переходного периода является совершенствование технических нормативов. Ранее нами отмечалось, что в Беларуси необходима разработка национального технического регламента по управлению безопасностью дорожной инфраструктуры [2]. В строительных нормах по проектированию дорог следует предусмотреть функциональную классификацию дорог. В практику проектирования дорог следует ввести новые концепции, такие как «дорога, прощающая ошибки» (forgiving road) [11] или «самопоясняющая дорога» (self-explaining road) [12, 13].

«Дорога, прощающая ошибки» – это инструмент предотвращения аварий и смягчения тяжести их последствий, связанных с человеческими ошибками. Поскольку все люди совершают ошибки, водители в конечном итоге и далее будут продолжать делать ошибочные маневры или действия. Более 80 % несчастных случаев обусловлены ошибками водителя. Статистика в разных странах показывает, что около 25–30 % несчастных случаев со смертельным исходом связаны с авариями, вызванными нахождением в придорожной полосе посторонних объектов [14]. Эти аварии в основном вызваны ошибками вождения, которые приводят к выезду с полосы движения или дороги. Существование более благоприятной, «прощающей» дорожной среды могло бы предотвратить несчастные случаи такого типа (и, как правило, дорожно-транспортные происшествия, связанные с ошибками вождения) и полностью или частично уменьшило бы серьезность последствий таких дорожно-транспортных происшествий. «Дорога, прощающая ошибки», определяется как дорога, которая спроектирована и построена таким образом, чтобы мешать развитию дорожных ошибок или блокировать их, а также предотвращать или смягчать негативные последствия ошибок в движении, позволяя водителю восстановить контроль над транспортным средством, либо вернуться на полосу движения без травм или повреждений.

Другой перспективной концепцией является «самопоясняющая дорога». Этот термин подразумевает взаимодействие между инфраструктурой (включая дорогу, обустройство дороги и всю придорожную среду) и участниками дорожного движения. Ключевой вопрос в этом случае заключается в том, что дорога может (либо с помощью разметки, либо знаков, либо другим способом) правильно донести до своих пользователей необходимые «сообщения», чтобы они могли использовать ее эффективно, в наименьшей степени отвлекаясь и совершая рискованные действия.

Концепция «самопоясняющая дорога» достаточно активно начала разрабатываться в первой половине 1990-х годов в исследованиях института TNO для голландского министерства транспорта [12, 13]. С целью формализации принципов и подходов к «самопоясняющей дороге» был реализован европейский проект SPACE [15]. В рамках проекта были сформулированы во многом схожие варианты определения понятия «self-explaining road».

Среди приведенных в проекте определений мы хотели бы отметить следующие [15]:

«Самопоясняющая дорога» – это дорога, по которой устройство и оборудование «ведут» или «направляют» водителей так, чтобы их вождение было безопасным.

«Самопоясняющая дорога» это дорога, обустроенная таким образом, чтобы водители автоматически адаптировали поведение к дороге и реальной дорожной (дорожно-транспортной) ситуации.

Еще одним направлением действий, направленным на повышение безопасности дорожной инфраструктуры и дорожного движения, является принятие в нашей стране стандарта ИСО 39001 «Системы менеджмента безопасности дорожного движения. Требования и руководство по применению».

*Пятой мерой* является расширение применения интеллектуальных транспортных систем. Решения в области ИТС позволяют обеспечить требования концепций «дорога, прощающая ошибки» и «самопоясняющая дорога» более экономичными способами. В особенности это касается дорог, запроектированных и построенных с применением старых советских норм. Переустройство таких дорог в соответствии с требованиями рассматриваемых концепций является дорогостоящим мероприятием. Телематические решения могут сгладить, а в ряде случаев даже устранить имеющиеся недостатки старого проектирования и строительства. Наилучшие же результаты дает совместное применение ИТС и концепций «дорога, прощающая ошибки» и «самопоясняющая дорога».

Приведенные меры не являются исчерпывающими. Однако их применение позволит подготовить профессиональное сообщество и в некоторой степени пользователей дорог к последующему внедрению современной концепции обеспечения безопасности дорожного движения.

## **Выводы**

Изложенное выше позволяет сделать следующие выводы.

Транспортные риски в Беларуси выше, чем у стран-соседей из ЕС и существенно выше, чем в странах-лидерах в области обеспечения безопасности дорожного движения. Для снижения транс-

портных рисков требуется переход на качественно новые практики и механизмы обеспечения безопасности дорожного движения. Примером передового опыта является концепция «Vision Zero». Внедрение подобной системы требует применения системного подхода и изменения философии. В условиях преобладания ситуационного управления осуществлять системные преобразования очень сложно.

В Беларуси имеется ряд проблем, которые не позволяют начать внедрение концепции «Vision Zero». Все проблемы можно разделить на следующие группы: этические, финансовые, институциональные, методологические, кадровые, технические. Наличие таких проблем говорит о недостаточной готовности общества к более безопасной дорожной инфраструктуре. Представляется целесообразным наличие переходного периода до полноценного принятия в Республике Беларусь современной концепции безопасности дорожного движения.

К числу основных мер, которые должны быть реализованы в переходный период, относятся следующие. Программа в средствах массовой информации, направленная на изменение отношения общества к проблемам дорожных аварий. Ужесточение штрафных санкций за нарушение правил дорожного движения. Совершенствование скоростных режимов на дорогах и контроль их соблюдения. Оценка рисков движения по дорогам. Совершенствование технических нормативов. Расширение применения интеллектуальных транспортных систем.

## **Литература**

1. Капский, Д. В., Богданович, С. В. Пути и возможности повышения безопасности дорожной инфраструктуры в некоторых странах Таможенного союза // Научно-технический журнал «Автомобильные дороги и мосты». – № 2 (22). – Минск, 2018. – С. 95–102.

2. Kapsky, D., Bogdanovich, S. & Volynets A. (2019). Implementation of the Road Traffic Safety Concept in Belarus In Proceedings of the International Conference “Vision Zero for Sustainable Road Safety in Baltic Sea Region”, 110–119 [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22375-5\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22375-5_13).

3. Блинкин, М. Я., Решетова, Е. М. Безопасность дорожного движения: история вопроса, международный опыт, базовые институции. – М. : Высшая школа экономики, 2013. – 240 с.
4. Johansson, R. (2009). Vision Zero – Implementing a policy for traffic safety. *Safety Science*, 47, 826–831.
5. Larsson, P., Dekker, S.W.A. & Tingvall, C. (2010). The need for a systems theory approach to road safety. *Safety Science*, 48, 1167–1174.
6. Bliss, T. & Breen, J. (2009). Implementing the Recommendations of the World Report on Road Traffic Injury Prevention. Country Guidelines for the Conduct of Road Safety Capacity Reviews and the Related Specification of Lead Agency Reforms, Investment Strategies and Safety Projects, 329 p. Retrieved from <http://documents.worldbank.org/curated/en/712181469672173381/pdf/81598-PUBLIC.pdf>.
7. Wegman, F., Dijkstra, A., Schermers, G., & van Vliet, P. (2006). Sustainable Safety in the Netherlands: Evaluation of National Road Safety Program. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1969, 72–78. <https://doi.org/10.3141/1969-12>
8. Dingus, T. A., Guo, F., Lee, S., Antin, J. F., Perez, M., Buchanan-King M. & Hankey J. (2016). Driver crash risk factors and prevalence evaluation using naturalistic driving data. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 10 (113), 2636–2641. <https://doi.org/10.1073/pnas.1513271113>.
9. Danish Road Traffic Accident Investigation Board (2014), Why do road traffic accidents happen? 66 p. Retrieved from: [http://www.hvu.dk/SiteCollectionDocuments/HVUdec14\\_UK\\_HvorforSkerUlykkerne.pdf](http://www.hvu.dk/SiteCollectionDocuments/HVUdec14_UK_HvorforSkerUlykkerne.pdf)
10. International transport forum (2015) Road infrastructure Safety Management Research Report, 148 p. Retrieved from <https://www.itfoecd.org/sites/default/files/docs/15irtadsafetymanagement.pdf>.
11. La Torre, F., Saleh, P., Cesolini, E. & Goyat, Y. (2012). Improving roadside design to forgive human errors. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 53, 235–244.
12. Theeuwes, J, Godthelp, H. (1995). Self-explaining roads. *Safety Science*, 19(2-3), 217–225. [https://doi.org/doi:10.1016/0925-7535\(94\)00022-u](https://doi.org/doi:10.1016/0925-7535(94)00022-u).
13. Theeuwes, J. & Godthelp, H. (1992). Begrijpelijkheid van de weg (Self-explaining roads). Report IZF 1992 C-8. Soesterberg: TNO Institute for Perception.

14. Bekiaris, E. & Gaitanidou, E. (2011). Towards Forgiving and Self-Explanatory Roads, Infrastructure and Safety in a Collaborative World, 15-22. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-18372-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-18372-0_2).

15. Cocu X., Casse C., Volckaert A. & Van Geem C. (2011). Self explaining road treatments: Report from expert workshop. Belgian Road Research Centre, 91 p. Retrieved from [http://www.cedr.eu/download/other\\_public\\_files/research\\_programme/eranet\\_road/call\\_2009\\_safety\\_space/03\\_SPACE\\_Deliverable3\\_Final\\_130520111.pdf](http://www.cedr.eu/download/other_public_files/research_programme/eranet_road/call_2009_safety_space/03_SPACE_Deliverable3_Final_130520111.pdf).

Статья поступила 02.09.2021

## РАЗВИТИЕ ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ПЕРЕВОЗОК НА ФОНЕ ПАНДЕМИИ COVID-19

*Карбаев Н. А.*<sup>1</sup>, гл. инж., *Бойков В. П.*<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф.,  
<sup>1</sup>ТОО «Прикаспийское управление строительства – Шымкент»,  
г. Шымкент, Узбекистан, e-mail: *shika\_nureke@mail.ru*

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: *trak\_atf@bntu.by*

## DEVELOPMENT OF TRUCK TRANSPORTATION IN THE BACKGROUND OF THE COVID-19 PANDEMIC

**N. Karabaev**<sup>1</sup>, Chief Engineer,

**V. Boykov**<sup>2</sup>, Doctor of technical Sciences, Professor,

<sup>1</sup>Limited Liability Partnership "Caspian Construction Administration -  
Shymkent" LLP, e-mail: *shika\_nureke@mail.ru*

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus,  
e-mail: *trak\_atf@bntu.by*

*В статье рассматриваются вопросы автомобильных грузовых перевозок в мире и влияние на них пандемии COVID-19. Анализирована сложившаяся ситуация и современные тенденции развития этого сектора экономики. Отмечено, что доля ВВП, потерянная в результате пандемии коронавируса в 2020 году, составила 6,7 %, а снижение выручки за период локализации пандемии снизилась на 40 %. Рассмотрено влияние COVID-19 на транспортную отрасль в краткосрочном и долгосрочном плане. Изучено развитие автомобильных грузовых перевозок в некоторых странах СНГ – стран Северной и Центральной Азии. В этих странах снижение темпов роста ВВП в 2020 году является самым высоким в Азиатско-Тихоокеанском регионе и индекс транспортной связности ЭСКАТО является самым низким. Перечислены 8 тенденции развития грузовых*

автомобильных перевозок в 2021 году. В Заключении отмечены четыре направления, деятельность в которых могут быть наиболее актуальными в сфере транспорта в 2021 году.

Ключевые слова: пандемия, COVID-19, автомобильный транспорт, грузооборот, тенденции развития автотранспорта, автомобильные грузовые перевозки, страны Северной и Центральной Азии.

*The issues of road freight transport in the world and the impact on them of the COVID-19 pandemic are considered. The current situation and current trends in the development of this sector of the economy are analyzed. It was noted that the share of GDP lost as a result of the coronavirus pandemic in 2020 was 6.7 %, and the decrease in revenue during the period of the pandemic's localization decreased by 40 %. The impact of COVID-19 on the transport industry in the short and long term is considered. The development of road freight transport in some CIS countries – the countries of North and Central Asia is studied. In these countries, the decline in GDP growth in 2020 is the highest in the Asia-Pacific region and the ESCAP Transport Connectivity Index is the lowest. Listed are 8 trends in the development of road freight transport in 2021. In the Conclusion, four areas are highlighted, the activities in which may be most relevant in the field of transport in 2021.*

Key words: pandemic, COVID-19, road transport, freight turnover, trends in the development of road transport, road freight transport, the countries of North and Central Asia.

## **Введение**

Пандемия COVID-19 создала огромное разрушение в повседневной жизни в современном обществе и оказала глубокое воздействие на все отрасли промышленности, включая транспортный сектор. Транспортная отрасль, которая считается важным видом деятельности, должна была продолжать работать в условиях изоляции, обеспечивая при этом социальное дистанцирование [1, 2]. Влияние коронавирусной болезни на транспортный сектор и соответствующие меры по преодолению этих трудностей становятся предметом широкого исследования. Учитывая различные неопределенности, связанные с этой болезнью и его последствиями (особенно в долгосрочном периоде), важно правильно строить стратегию развития транспортного

сектора с учетом перспектив развития смежных областей [3]. В связи с этим рассмотрим сложившуюся ситуацию в сфере грузовых автомобильных перевозок на фоне пандемии COVID-19 и современные тенденции развития этого сектора экономики.

## **1. Автомобильные грузовые перевозки в мире и влияние на них COVID-19**

Вспышки, такие как вирус COVID-19, являются факторами риска нарушения работы цепочек поставок, характеризующихся очень сильным и немедленным воздействием на структуру цепочки поставок [4]. Поэтому понимание влияния COVID-19 на объем перевозок и динамику грузоподъемности имеет первостепенное значение [5]. В результате наступления пандемии COVID-19 многие правительства по всему миру в качестве первоначальной реакции закрыли свои сухопутные, воздушные и морские границы для несущественного движения. Эти меры привели к тому, что десятки тысяч грузовиков застряли на границах по всему миру, что существенно повлияло на доставку товаров первой необходимости, таких как продукты питания, фармацевтические препараты, медицинские принадлежности и топливо. Это было особенно критичным для тех экономически наиболее уязвимых стран, которые часто в значительной степени зависят от импорта, чтобы покрыть свои основные потребности [6].

Операторы автомобильных дорог столкнулись с двумя основными проблемами: с одной стороны, необходимость справиться с потенциальными сбоями, вызванными пандемией и национальной изоляцией на почти три месяца, предоставление дорожных услуг и требование обеспечения надлежащей эксплуатации и технического обслуживания, а также с другой стороны, сильное негативное влияние пандемии на уровень трафика.

Многочисленные примеры показывают, что реакция руководства оператора, по сути, является первой реакцией на краткосрочные воздействия при одновременном обеспечении баланса между здоровьем и безопасностью работников, внутреннего управления бизнесом и общего экономического воздействия [1]. Операторы шоссе были не совсем готовы к такому событию и стали более сосредоточены на приоритетность безопасности своих сотрудников и клиентов. Что касается уровня трафика, пандемия оказала серьезное воздействие,

хотя и в разной степени, в зависимости от различных типов транспортных средств (тяжелых, легких, пассажирских, грузовых и других типов транспортных средств) и расположения автомагистралей (прибрежные или внутренние).

Доля валового внутреннего продукта (ВВП), потерянная в результате пандемии коронавируса в 2020, году составила 6,7 % [7] и транспортные перевозки являются одним из существенных составляющих дохода. По данным Международного союза автомобильного транспорта (IRU), выручка за период локализации снизилась на 40 % (по сравнению с показателями 2019 года). Многие транспортные операции, включая транспортировку автомобильных запчастей, одежды, цветов и строительных материалов, почти полностью остановились [6].

Влияние COVID-19 на транспортную отрасль в краткосрочном и долгосрочном плане по видам транспорта более детально изучено в [2]. В частности, в данной работе указаны временные изменения и долгосрочные последствия, которые испытывают три вида транспорта: железнодорожный транспорт (включая метро), автомобильные перевозки и авиалинии. Рассмотрим особенности автомобильного транспорта, как объекта нашего исследования.

Впервые за многие годы мир стал свидетелем беспрепятственного движения транспорта во многих частях мира с огромной плотностью населения. Для основных работников, которым приходится добираться до работы, вождение стало намного проще из-за меньшего количества пробок на дорогах. Та же концепция применима к грузовикам, которые доставляют заказы электронной коммерции. Уменьшение количества автомобилей и автобусов привело к более чистому воздуху и более четким видам во многих городах.

Рассмотрим теперь результаты краткосрочного воздействия.

**1. Воздействие на окружающую среду.** Международное исследование показало, что ежедневные выбросы снизились на 17 % в период с января по апрель 2020 года по сравнению с январем и апрелем 2019 года. Исследование показывает, что это самое большое ежегодное сокращение выбросов углерода со времен Второй мировой войны. Китай и США являются двумя главными источниками выбросов углерода во всем мире. В Китае выбросы снизились на 533 500 фунтов, а в США – на 456 350 фунтов.

**2. Влияние на выручку.** Из-за ограничений социального дистанцирования и увеличения количества сотрудников, работающих удаленно, можно заметить значительное сокращение количества водителей на дорогах. Сильно пострадали дорожные мосты, потребление топлива и налоги на топливо, которые являются одним из наиболее важных источников дохода. Многие транспортные департаменты заявили о значительном падении доходов

**3. Безопасность дорожного движения.** Как правило, уменьшение количества транспортных средств на дорогах приводит к уменьшению количества столкновений и травм. Различные ключевые факторы, такие как стресс и беспокойство из-за пандемии, рост употребления наркотиков и алкоголя во время вождения, сокращение трафика, которое приводит к превышению скорости и опасному вождению, могут отрицательно сказаться на безопасности дорожного движения [8].

К долгосрочным последствиям влияния на автомобильный транспорт можно отнести следующие:

**1. Цифровизация услуг.** Во-первых, из-за пандемии наметилась тенденция уменьшения кассовых сбор наличных денег, чтобы свести к минимуму взаимодействие между людьми, стали чаще применяться безналичные расчеты. Во-вторых, использование мобильных данных оказалось полезным для отслеживания распространения пандемии по всему миру. Но эта практика вызывает вопросы о правах на неприкосновенность частной жизни и посягательстве на гражданские свободы после того, как пандемия закончится.

**2. Автономный транспорт:** во время распространения эпидемии многие секторы китайского общества внедрили ИИ (искусственный интеллект), большие данные и роботизированные сервисы для контроля и предотвращения распространения пандемии [9]. Автономные технологии, уменьшили бремя коронавируса, доставляя медицинские принадлежности и продукты питания.

## **2. Развитие автомобильных грузовых перевозок в СНГ**

Несмотря на то, что развитие автомобильных перевозок во всем мире происходит по общим законам, существуют определенные региональные отличия, связанные с историческими, культурными или географическими особенностями.

Пандемия COVID-19 – это беспрецедентный глобальный кризис, серьезно влияющий на благополучие людей во всем мире, а также в Азиатско-Тихоокеанском регионе. Фактическое экономическое воздействие пандемии на Азиатско-Тихоокеанский регион еще предстоит полностью раскрыть, но ЭСКАТО прогнозирует значительное замедление роста ВВП с неравномерным распределением последствий по странам и регионам [10].

Как видно из рисунка 1, ожидается, что снижение темпов роста ВВП в Северной и Центральной Азии (СЦА) будет одним из самых высоких в Азиатско-Тихоокеанском регионе (на рисунке СЦА отмечено как NCA). В работе [10] как страны СЦА рассматриваются: Азербайджан, Армения, Грузия, Казахстан, Кыргызстан, Российская Федерация, Таджикистан, Туркменистан и Узбекистан.

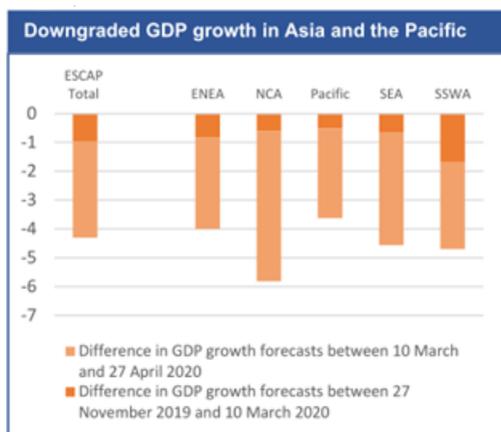


Рисунок 1 – Уменьшение ВВП в странах Азии в 2020 г.

Проблемы, связанные с пандемией, еще раз подчеркнули трудности транспортной связи, с которыми сталкиваются страны Северной и Центральной Азии. Несмотря на прогресс, достигнутый в последние годы, страны данного региона по-прежнему страдают от высоких транспортных расходов и низкого уровня транспортной связи из-за своего географического положения, нехватки транспортной инфраструктуры и операционной слабости грузовых перевозок. Стратегически расположенная между Европой и Азией, Северная и Центральная Азия недостаточно реализовали свой транзитный потенциал

в ущерб своей способности интегрировать региональные и глобальные цепочки поставок.

Дополнительные трансграничные меры контроля и проверки, введенные для борьбы с COVID-19 в Северной и Центральной Азии, и ее основных торговых и транзитных партнерах, усугубили и без того высокие затраты на транспортные операции в этих странах, не имеющих выхода к морю. Относительно низкий уровень цифровизации и упрощения трансграничных транспортных и торговых операций усугубили существующие проблемы.

Анализ показывает, что, несмотря на сложные начальные условия, Северная и Центральная Азия могут стать лидерами в коренном изменении ландшафта региональных транспортных соединений и эффективном восстановлении после кризиса. Этого можно достичь, опираясь на новые инициативы по упрощению формальностей и цифровизации, которые были введены в рамках ответных мер на COVID-19. Пока страны США, как правило, занимают низкие места по показателям упрощения перевозок и логистики в мире. Индекс транспортной связности ЭСКАТО помещает Северную и Центральную Азию в нижнюю часть региона, далеко позади региональных и мировых лидеров в области транспортных сообщений (рисунок 2).

Вследствие своего географического положения и отсутствия выхода к морю Северная и Центральная Азия в значительной степени зависят от наземного транспорта. По оценкам 2017 года, на автомобильный транспорт приходилось 93,4 % грузоперевозок в Кыргызстане и 78 % грузов, перевезенных в Российскую Федерацию. Однако следует отметить, что, если принять во внимание расстояние перемещения грузов, измеряемое в тонно-километрах, железнодорожный транспорт является доминирующим видом грузовых перевозок в Северной и Центральной Азии. В Казахстане 61,9 % грузооборота в 2018 году было перевезено по железной дороге, за ней следовало 37,7 % автомобильным транспортом. На другие виды транспорта, а именно воздушный и внутренний водный транспорт, приходилось всего 0,04 % от общего грузооборота. Аналогичное разделение по видам транспорта произошло в Узбекистане в 2018 году, где на долю железнодорожного транспорта приходилось 62 %, а автомобильного – 37 %.

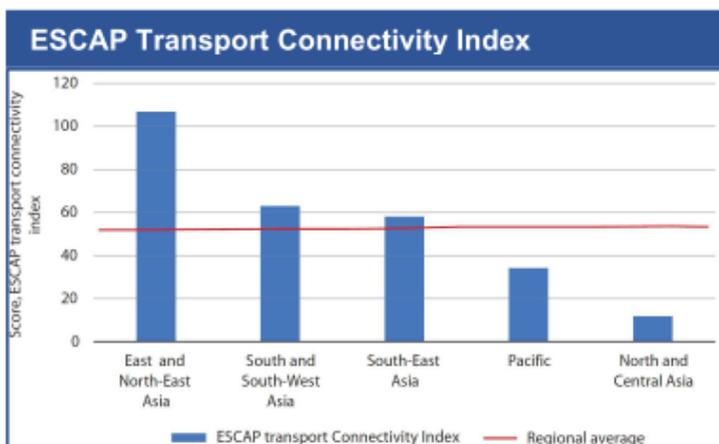


Рисунок 2 – Индекс транспортной связности ЭСКАТО

Казахстан и Узбекистан активно работают над развитием внутренних и внешних транспортных коридоров, что привело к увеличению торговли с соседями и за их пределами. Азербайджан планомерно развивает крупные транспортные проекты внутри страны и субсидирует их развитие за рубежом.

Имеющиеся данные и цифры показывают, что влияние пандемии на грузооборот и пассажирооборот в Северной и Центральной Азии в первом квартале 2020 года было неоднозначным, при этом в некоторых странах к марту 2020 года был зарегистрирован даже небольшой положительный рост. Однако в двух случаях, которые включают данные за апрель 2020 года (Азербайджан и Кыргызстан), показывают снижение товарооборота в соответствии с развивающейся пандемией. В таблице 1 приведены объемы сокращения грузооборота в течение первых 3–4 месяцев 2020 года.

По данным анализа, особенно сильно пострадали торговые и транзитные партнеры региона. Например, Российская Федерация, крупнейшая экономика в Северной и Центральной Азии, испытала серьезный спад в грузовых перевозках. Грузоперевозки автомобильным транспортом в марте-апреле просели примерно на 29 %. Падение загрузки на РЖД в апреле составило 11 %. Грузооборот внутренних водных путей снизился на 14 %.

Таблица 1 – Объемы сокращения грузооборота в странах СЦА в 2020 г.

Страны	Сокращение грузооборота, %	Период
Армения	+10,3	Янв. – Март 2020 г.
Азербайджан	-4,1	Янв. – Апр. 2020 г.
Грузия	Нет данных	Янв. – Март 2020 г.
Казахстан	-1,4	Янв. – Март 2020 г.
Кыргызстан	-7,6	Янв. – Апр. 2020 г.
Таджикистан	+5,1	Янв. – Март 2020 г.
Туркменистан	Нет данных	Янв. – Март 2020 г.
Узбекистан	+0,6	Янв. – Март 2020 г.

За некоторыми исключениями, внешняя торговля, экспорт и импорт сократились по сравнению с прошлым годом. Помимо снижения объемов внешней торговли, некоторые особенности существующей транспортной связности в регионе, возможно, способствовали еще большему сбою транспортных операций и более высоким экономическим издержкам кризиса.

Во-первых, дополнительные трансграничные меры контроля и проверки, введенные для борьбы с COVID-19. Это усугубят и без того высокие затраты на торговые и транспортные операции в странах, не имеющих выхода к морю.

Во-вторых, сильная зависимость грузовых перевозок от автомобильного транспорта. Внутренняя и внутрирегиональная связность, ориентированная на дороги, приводит к хорошо задокументированным узким местам и эксплуатационным ограничениям, а также к дополнительным расходам. Кроме того, автомобильный транспорт оказался гораздо более уязвимым к угрозам пандемии, чем другие виды наземного транспорта.

В-третьих, это относительно низкий уровень цифровизации и упрощения трансграничных транспортных и торговых операций. Глобальное исследование ООН по содействию цифровой и устойчивой торговле за 2019 год показывает, что средняя реализация 31 меры по упрощению процедур торговли и безбумажной торговли странами Северной и Центральной Азии составляет 65,6 %, что соответствует уровню Восточной и Северо-Восточной Азии, и Юго-Восточной Азии. Общие уровни реализации в странах СЦА сильно различаются в зависимости от страны. Азербайджан и Российская Федерация достигли высоких показателей реализации – более 80 %. Казахстан

и Узбекистан составляют 67 % и 63 % соответственно, а Кыргызстан является страной с самым низким уровнем реализации – 38 %.

Рассмотрим далее принятые меры в сфере транспортной политики в ответ на влияние COVID-19.

Международная организация ЭСКАТО отслеживает ответные меры политики региональной сети транспортной инфраструктуры в Азиатско-Тихоокеанском регионе. Анализ ЭСКАТО показывает, что с самого начала кризиса COVID-19 страны региона отреагировали крупномасштабными действиями, такими как объявление чрезвычайного положения, блокировка в разных странах или в крупных городах или комендантский час. Они пытались снизить вероятность импорта вируса путем: полного или частичного закрытия границ; внедрение досмотра в пунктах пропуска через границу; и введение запретов или ограничений на поездки.

Однако, признавая важность бесперебойных поставок товаров первой необходимости, продуктов питания и медицинских товаров, в большинстве стран грузовые перевозки были освобождены от таких строгих мер. Кроме того, были приняты меры по упрощению процедур торговли и транспорта, чтобы упростить перемещение как двусторонних, так и транзитных грузовых перевозок через границы, при этом несколько стран в экспериментальном порядке опробовали новые цифровые решения для поддержки трансграничных грузовых операций.

Наконец, что очень важно, страны США приложили усилия для повышения уровня координации во время пандемии.

В заключение следует отметить, что реакция стран США на пандемию COVID-19 свидетельствует о том, что в регионе сохранялась минимальная транспортная связь, и большинство стран старались сохранить свои границы в рабочем состоянии для грузовых перевозок. Однако дополнительные задержки, неопределенность и сокращение спроса могут поставить многих транспортных операторов под угрозу, подрывая здоровье сектора грузовых перевозок, что может иметь серьезные последствия после кризиса. В этом контексте восстановление потребует сильной и продолжительной поддержки со стороны как правительств, так и международного сообщества развития.

### **3. Тенденции развития грузовых автомобильных перевозок в 2021 году**

В результате ответных мер на влияние COVID-19, наметились тренды в сфере грузовых автомобильных перевозок, в прочем как и в остальных сферах транспорта. Различные тенденции в транспортной отрасли изучены, например, в [11–16]. Рассмотрим, к примеру, 8 основных тенденций транспортной отрасли в 2021 году согласно [12].

#### Тенденция № 1 – внедрение облачных систем.

Одной из крупнейших тенденций транспортной отрасли на 2021 год является внедрение облачных систем, поскольку облачные платформы используют модель «программное обеспечение как услуга», которая открывает неограниченные возможности для масштабируемости компаний и инновационного использования цифровых ресурсов. Это позволяет достичь более высокой прибыльности и превзойти обычную отдачу от возможностей локальных систем.

#### Тенденция № 2 – Интегрированное путешествие без трения.

Необходимость сделать путешествия более комфортным и беспроблемными в основном проявляется в росте мобильности как услуги. Тем не менее, ряд новых тенденций в транспортной отрасли, объединенных и направленных на минимальное количество остановок или контрольно-пропускных пунктов, приводит к этому ключевому сдвигу к интегрированным путешествиям и перевозкам. Незначительные тенденции – это оптимизация инфраструктуры, создание центров мобильности для мультимодальных перевозок, создание платформ для безбилетных поездок, а также внедрение инноваций в области мобильности и соединений последней мили.

#### Тенденция № 3 – Видимость и GPS приборы защиты от кражи.

Сегодня компании электронной коммерции, розничной торговли и логистики уделяют повышенное внимание повышению прозрачности, поэтому внедрение технологий отслеживания и корректировка для повышения прослеживаемости являются одними из основных движущих тенденций в транспортной отрасли в этом году. Например, GPS приборы защиты от кражи позволяют получать информацию о местонахождении всего парка автомобилей и отдельных предметов в пути почти в реальном времени. Дополнительные протоколы безопасности также помогут избежать общих потерь.

#### Тенденция № 4 – Самоходные грузовики.

Технология для беспилотных грузовиков все еще находится в стадии совершенствования, и ей необходимо пройти определенные этапы, такие как улучшение программного обеспечения без водителя, чтобы оно могло эффективно работать на городских дорогах с интенсивным движением. Однако это одна из тенденций будущего развития транспорта. В долгосрочной перспективе транспортным компаниям следует подготовиться к грядущим технологическим изменениям в отрасли и начать оснащать свои грузовики самонавигационными системами управления, которые могут «учиться» у реальных водителей. На самом деле это будущее даже ближе, чем может показаться. Например, электрический грузовик Tesla имеет функции автопилота, которые могут значительно облегчить процесс вождения.

#### Тенденция № 5 – Соблюдение нормативных требований.

Правильнее будет сказать, что соблюдение нормативных требований – это необходимость, а не одна из последних тенденций в сфере транспорта. Коммерческие транспортные компании должны быть в курсе последних требований и постановлений, принятых, измененных или отмененных любым местным, государственным или федеральным правительством. Будь то правила в отношении электронных журналов, сверхурочной работы или правила безопасности, правила своевременного мониторинга всегда будут тенденцией.

#### Тренд № 6 – Блокчейн в логистике.

Как известно, блокчейн (цепь из блоков) – выстроенная по определенным правилам непрерывная последовательная цепочка блоков (связный список), содержащих информацию. Одним из перспективных вариантов использования технологии блокчейн в грузовых перевозках является обеспечение точности записи истории производительности. Когда грузовик продается во второй раз, у потенциальных клиентов могут возникнуть вопросы о том, как этот автомобиль использовался. Поскольку транзакции блокчейна неизменяемы и прозрачны, все стороны, участвующие в транзакции, могут быть уверены, что информация о грузовике заслуживает доверия.

Еще одно перспективное использование блокчейна на транспорте – мониторинг пропускной способности. Стоимость перевозки зависит от объема груза. Использование специальных датчиков мо-

жет помочь определить объем пространства, занимаемого конкретным грузом. Эти данные можно использовать для расчета стоимости перевозки. Хранение этой информации в системе на основе блокчейна позволит самостоятельно выполнять платежи в зависимости от количества места, занятого фрахтом.

#### Тенденция № 7 – Доставка по адресу.

Рост бизнеса электронной коммерции приводит к увеличению спроса на адресную доставку. Лучшее обслуживание означает более высокую конкурентоспособность. Компаниям, занимающимся тяжелыми грузовыми перевозками, следует подумать о добавлении парка небольших транспортных средств, чтобы завоевать большую часть рынка. Таким образом, оптимизация доставки последней мили – одна из тенденций транспортно-логистической отрасли 2021 года.

#### Тенденция № 8 – Доставка дронами.

В рамках тенденции доставки «последней мили» как среди розничных продавцов, так и среди транспортных компаний, некоторые компании уже доставляют посылки гражданам и компаниям с помощью дронов. В конце 2016 года Amazon впервые доставила заказ своему клиенту с помощью дрона. Эта доставка осуществлялась в Англии в рамках новой программы Amazon под названием Prime Air, которая подразумевала, что покупатель может получить посылку за 30 минут. После успеха Amazon различные компании начали инвестировать в доставку дронами, чтобы повысить рентабельность своего бизнеса и улучшить качество обслуживания клиентов. В эпоху COVID-19 бесконтактная адресная доставка стала самой популярной и востребованной из всех современных тенденций транспортной отрасли. Это побудило еще больше компаний обратить внимание на этот вариант доставки и начать его внедрять.

## **Заключение**

COVID-19 нанес серьезный удар по транспортной системе, которая и без того была уязвима для изменений. Люди и их поведение навсегда изменится из-за COVID-19. Соответственно, и транспорт уже никогда не будет прежним. Насколько это изменится, будет неизвестно какое-то время. Это должно побудить транспортные

агентства, правительства и заинтересованные стороны следить за закономерностями, предвидеть будущие последствия и планировать более сильное будущее.

Уроки, извлеченные из непосредственных и краткосрочных мер, принимаемых правительствами показывают, что транспортный сектор был не подготовлен к эксплуатации в тех условиях, в результате от пандемии. Реализация политики, как пребывание дома, что создало повышенную потребность в потреблении и 360 градусов поворот в сторону электронного бизнеса, не может быть сопровождаться путем закрытия границ или введения в ряд ограничений для водителей грузовиков. Эта комбинация привела к нарушению международных цепочек поставок и, следовательно, к временной нехватке продуктов питания, предметов первой необходимости и лекарств. Кроме того, введение различных мер, ограничений и политики правительствами в разные моменты времени выявило отсутствие международной координации в секторе внутреннего транспорта согласованного протокола, который должен выполняться во время пандемий.

Принимая во внимание выше названные ключевые пробелы, деятельность в ниже перечисленных областях могут быть наиболее актуальными в сфере транспорта [6]:

1. На нормативном уровне: продолжение работы группы экспертов по разработке транспортных мер реагирования на COVID-19 и аналогичные международные кризисы.

2. На уровне существующих правовых инструментов и конвенций:

– введение электронных сертификатов для экипажа и / или пассажиров;

– разработать правила транзита и сотрудничества между транспортными компаниями в случае пандемий и других трансграничных чрезвычайных ситуаций;

– провести стресс-тесты различных международных конвенций, чтобы определить, где можно или нужно внести поправки, чтобы сделать их более «устойчивыми к пандемии».

3) На уровне цифровизации:

– поддержка оцифровки транспорта и торговли, что повышает осведомленность во всем мире и, если возможно, ускорение возможностей цифровой реализации различных уже существующих транспортных правовых инструментов в секторе внутреннего транспорта;

– разработать согласованный набор стандартов для эквивалентов электронных документов, чтобы обеспечить функциональную совместимость между различными видами транспорта, включая внутренний водный транспорт и разработать новые стандарты для основных сопроводительных документов.

4) На уровне постоянного регионального, межрегионального и межправительственного диалога и обмена информацией:

– организация межсекторальных встреч по мере необходимости (с участием, например, морского и авиационного секторов) для обмена опытом, а также регулярного обзора и обсуждения сотрудничества между различными видами транспорта для предотвращения международного распространения инфекционных заболеваний через транспорт и усиления региональной и межрегиональной координации для облегчения границ;

– дальнейшее развитие и укрепление инициатив по транспорту, окружающей среде и охране здоровья;

– рассмотреть возможность разработки справочных материалов для сбора опыта в области управления транспортом в ответ на кризис COVID-19.

## **Литература**

1. Cruz, C. O.; Sarmiento, J. M. The Impact of COVID-19 on Highway Traffic and Management: The Case Study of an Operator Perspective. *Sustainability* 2021, 13, 5320. <https://doi.org/10.3390/su13095320>

2. Subramanya, K., Kermanshachi, S. Impact of COVID-19 on Transportation Industry: Comparative Analysis of Road, Air, and Rail Transportation Modes. 2021, 10.1061/9780784483534.020.

3. Junyi Zhang, Yoshitsugu Hayashi, Lawrence D. Frank. COVID-19 and transport: Findings from a world-wide expert survey, *Transport Policy*, Volume 103, 2021, Pages 68–85, ISSN 0967-070X, <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.01.011>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967070X21000172>)

4. Ivanov, D. Predicting the impacts of epidemic outbreaks on global supply chains: a simulation-based analysis on the coronavirus outbreak (COVID-19/SARS-CoV-2) case. *Transp. Res. E Logist. Transp. Rev.* 2020. 136, 101922. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.101922>.

5. Loske, D. The impact of COVID-19 on transport volume and freight capacity dynamics: An empirical analysis in German food retail logistics. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 6, 2020. 100165. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.trip.2020.100165>).
6. Intermodal Transport in the Age of COVID-19 – Practices, Initiatives and Responses. Building pandemic-resilient transport systems. United Nations, 2021, Geneva.
7. Share of Gross Domestic Product (GDP) lost as a result of the coronavirus pandemic (COVID-19) in 2020. (<https://www.statista.com/statistics/1240594/gdp-loss-covid-19-economy/>), (07.06.2021).
8. Katrakazas, C., Michelaraki, E., Sekadakis, M., Yannis, G. A descriptive analysis of the effect of the COVID-19 pandemic on driving behavior and road safety. *Transportation research interdisciplinary perspectives*, 2020. 7, 100186.
9. Zeng, Z., Chen, P. J., Lew, A. A. From high-touch to high-tech: COVID-19 drives robotics adoption. *Tourism Geographies*, 2020. 1–11.
10. Freight Transport and COVID-19 in North and Central Asia: Changing the Connectivity Paradigm. United Nations, Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (ESCAP). [https://www.unescap.org/sites/default/files/SONCA\\_TD\\_policy%20brief\\_FINAL.pdf](https://www.unescap.org/sites/default/files/SONCA_TD_policy%20brief_FINAL.pdf), (07.06.2021).
11. The future of the EU transport sector (2021-2024) – four trends. <https://dr2consultants.eu/the-future-of-the-eu-transport-sector-2021-2024-four-trends/>, (07.06.2021).
12. Top 8 Transportation Industry Trends in 2021. <https://stfalcon.com/en/blog/post/transportation-industry-trends>, (07.06.2021).
13. 7 Key Transportation Industry Trends (2021-2025). <https://explodingtopics.com/blog/transportation-industry-trends>, (07.06.2021).
14. 5 Global Supply Chain and Logistics trends 2021. <https://blog.greencarrier.com/5-global-supply-chain-and-logistics-trends-2021/>, (07.06.2021).
15. 2021 Truckload Freight Market Trends and Proactive Steps Shippers Can Take. [https://www.supplychain247.com/article/2021\\_truckload\\_freight\\_market\\_trends\\_and\\_proactive\\_steps\\_shippers\\_can\\_take/postbidship](https://www.supplychain247.com/article/2021_truckload_freight_market_trends_and_proactive_steps_shippers_can_take/postbidship), (07.06.2021).

16. Transportation and logistics trends to watch in 2021. <https://www.jdsupra.com/legalnews/transportation-and-logistics-trends-to-6755848/>, (07.06.2021).

Статья поступила 22.09.2021

УДК 656.073.7

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ГРУЗОВЫХ ПЕРЕВОЗОК С УЧЕТОМ ОСТАТОЧНЫХ РЕСУРСОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

*Карабаев Н. А.*, гл. инж.,  
ТОО «Прикаспийское управление строительства – Шымкент»,  
г. Шымкент, Узбекистан, e-mail: [shika\\_nureke@mail.ru](mailto:shika_nureke@mail.ru)

## **OPTIMIZATION OF FREIGHT TRANSPORTATION TAKING INTO ACCOUNT REMAINING VEHICLES RESOURCES**

*N. Karabaev*, Chief Engineer,  
Limited Liability Partnership "Caspian Construction  
Administration – Shymkent" LLP, e-mail: [shika\\_nureke@mail.ru](mailto:shika_nureke@mail.ru)

*В статье рассматриваются вопросы оптимизации грузовых перевозок с учетом остаточных ресурсов транспортных средств. Приведен обзор работ, посвященных вопросам оптимизации в целом, и оптимизации логистических процессов в частности. Рассмотрено применение метода Дейкстры для решения задачи оптимизации перевозок. Создан алгоритм и программный код для оптимизации перевозок с учетом остаточных ресурсов транспортных средств предприятия. Код выдает тип транспортных средств, которые должны быть использованы для выполнения заказов на доставку груза, маршрут и стоимость перевозок. Все это выполняется из*

условия минимума расходов на доставку груза, и с учетом остаточных ресурсов транспортных средств, имеющихся в транспортном предприятии. С помощью данного кода произведен модельный расчет для некоего, примерного предприятия в Витебской области, где имеются десять грузовых автомобилей. Задача решена для графа из 12 вершин. В качестве вершин взяты населенные пункты данной области. Алгоритм выдает сообщения о транспортных средствах, у которых не хватает остаточных ресурсов для выполнения заказа. Итоговый отчет программного кода содержит информацию о назначенных на заказ транспортных средствах, расходы на выполнение заказа, путь до конечного пункта, коэффициенты использования грузоподъемности и маршрут с указанием всех населенных пунктов, через которых должны проехать данные автомобили. Данный программный код может быть использован в логистической компании как инструмент принятия решения при выполнении заказов на доставку грузов. В будущем планируется внедрить данный алгоритм и программный код в одно из предприятий Республики Беларусь или Республики Казахстан.

Ключевые слова: оптимизация перевозок, остаточный ресурс, граф, вершина, алгоритм Дейкстры, коэффициент использования грузоподъемности, маршрут.

*The issues of road freight transport optimization, taking into account the residual resources of vehicles are considered. An overview of works devoted to optimization in general and optimization of logistics processes in particular is given. The application of Dijkstra's method for solving the problem of traffic optimization is considered. An algorithm and program code have been created to optimize transportation, taking into account the residual resources of the company's vehicles. The code gives the type of vehicles that should be used to fulfill orders for the delivery of goods, the route and the cost of transportation. All this is carried out on the basis of the minimum cost of cargo delivery, and taking into account the residual resources of vehicles available in the transport company. Using this code, a model calculation was made for a certain, exemplary enterprise in the Vitebsk region, where there are ten trucks. The problem is solved for a graph of 12 vertices. The settlements of the given region were taken as graph vertices. The algorithm generates messages about vehicles that do not have enough residual resources to fulfill the order. The final report of*

*the program code contains information about the vehicles assigned to the order, the cost of completing the order, the path to the destination, the load utilization rates and the route indicating all settlements through which the vehicles must pass. This program code can be used in a logistics company as a decision-making tool when fulfilling orders for the delivery of goods. In the future, it is planned to introduce this algorithm and program code into one of the enterprises of the Republic of Belarus or the Republic of Kazakhstan.*

*Key words: optimization of transportation, residual resource, graph, vertex, Dijkstra's algorithm, load capacity utilization rate, route.*

## **Введение**

Оптимизация логистических процессов всегда была и остается главной задачей в организации процесса перевозки грузов. При этом в первую очередь определяется оптимальный маршрут доставки груза. Это позволяет минимизировать расход топлива и время доставки. Во-вторых, определяется способ перевозки, т. е. тип транспортного средства (ТС) с учетом грузоподъемности и других характеристик ТС. Компания-перевозчик производит оптимизацию перевозок, чтобы предложить заказчику услуги в более выгодных условиях, чем конкуренты. Оптимизация затрат на логистику позволит организатору перевозок более эффективно распоряжаться со своими ресурсами и достичь более высоких коэффициентов полезного действия системы перевозки.

## **1. Состояние вопроса и задачи исследования**

Приведем небольшой обзор работ по вопросам оптимизации. Как известно, оптимизация является одной из старых направлений в науке. Она применяется во многих областях: экономика, управление, планирование, логистика, робототехника, проектирование, обработка сигналов и т.д. [1]. Оптимизация очень важна и актуальна практически для каждого направления [2]. Профессиональные организации должны максимизировать прибыль и минимизировать затраты [3].

Любая задача оптимизации состоит из трех основных составляющих [4]:

– *переменные оптимизации*, также называемые проектными переменными;

– *функция затрат*, также называемая целевой функцией;

– *ограничения*, выраженные в виде равенства или неравенства.

В литературе были рассмотрены многие типы задач оптимизации и изучено множество различных типов алгоритмов [4]. Задачи оптимизации можно разделить на следующие общие категории в зависимости от типа переменных решения, целевой функции и ограничений:

– *линейное программирование*: целевая функция и ограничения линейны. Переменные бывают скалярными и непрерывными;

– *нелинейное программирование*: функционал и целевые ограничения не являются линейными. Переменные решения являются скалярными и непрерывными;

– *целочисленное программирование*: переменные решения – скалярные и целые числа;

– *смешанное целочисленное линейное программирование*: целевая функция и ограничения линейны. Переменные решения являются скалярными; некоторые из них являются целыми числами, а другие – непрерывными переменными;

– *смешанное целочисленное нелинейное программирование*: задача целочисленного линейного программирования, при этом целевая функция и ограничения нелинейные;

– *дискретная оптимизация*: решение задач, связанных с дискретными переменными (целыми числами), и др. [5].

А в качестве задач оптимизации чисто логистических систем можно назвать следующие:

– *задача назначения* [6] – определить необходимое минимальное количество людей и машин, чтобы выполнить данный объем работы с минимальными затратами и максимальной прибылью;

– *задача «рюкзака»* [7] – при ограниченном весе пополнить рюкзак предметами максимальной стоимости. Каждый предмет имеет определенную ценность и определенный вес;

– *задача маршрутизации транспортных средств* [8] – построить маршрут для набора транспортных средств, чтобы они посетили группу географически распределенных клиентов только один раз;

– *задача планирования производства* [9] – планирование производственных заказов, т. е. решить, какие машины использовать и в каком порядке производить продукцию;

– *задача кратчайшего пути* [10] – задача поиска пути между двумя пунктами, при котором сумма расстояний минимизирована. Решение задачи должно содержать информацию о стоимости кратчайшего пути между исходной точкой и пунктом назначения, а также последовательность узлов, через которые проходит транспортное средство [11]. Одним из известных методов решения данной задачи является метод Дейкстры;

– *задача коммивояжера* [12] – состоит в том, чтобы найти маршрут, по которому продавец, начиная с исходного местоположения, прошел заданный набор городов и вернулся в исходное местоположение, так чтобы общее расстояние было минимальным, и каждый город посещал только один раз.

Типичные задачи оптимизации не ограничиваются этими задачами. В действительности, задачи реального мира обычно требуют гораздо более сложных определений и использования сложных алгоритмов для поиска оптимальных решений.

Из перечисленных задач для нас практический интерес представляют две задачи: задача маршрутизации транспортных средств и задача кратчайшего пути. Но с точки зрения эксплуатации транспортных средств автопарка очень важно учесть их остаточные ресурсы [13]. В связи с этим рассмотрим задачу оптимизации автоперевозок с учетом остаточных ресурсов транспортных средств автопарка.

## **2. Методы оптимизации грузовых перевозок**

Существует широкий обзор процессов оптимизации логистических процессов. Например, в [14] рассмотрены проблемы стоимости логистики, выделение некоторых методов оценки и определения удельных затрат для различных видов транспорта при распределении грузов. Помимо затрат на транспортировку, выделены другие затраты в цепочке поставок, а также методы расчета затрат, используемые в логистической деятельности. В этом контексте также выявлены способы оптимизации транспортных затрат в логистической цепочке.

В [15] оптимизация логистики рассмотрена используя онтологию, т. е. сделана попытка всеобъемлющей и подробной формализации оптимизации с помощью концептуальной схемы. Эта онтология используется в процессе программирования и моделирования бизнес-процессов. Определенные онтологии разделяют область знаний логистики и оптимизации. База знаний включает стандартные методы оптимизации, а также определение онтологий для решения логистических проблем. Это может помочь лучше понять сложность логистических проблем.

Задачи оптимизации логистики часто бывают сложными. Поэтому в [16] рассмотрено возможные способы облегчения процесса оптимизации. В ней представлена классификация общих принципов упрощения, которые полезны для уменьшения сложности логистических проблем, чтобы облегчить понимание между теоретиками и практиками. Вывод соответствующих принципов основан на изучении пяти проблем в литературе по логистике: местонахождение предприятия, система распределения, размер партии, упаковка контейнеров и маршрутизация транспортных средств.

Как было сказано выше, для нас практический интерес представляет две задачи: задача маршрутизации транспортных средств и задача кратчайшего пути. Одним из наиболее эффективных методов оптимизации маршрутов является метод Дейкстры [17]. Метод Дейкстры разработан голландским ученым Эдсгером Дейкстрой в 1959 году. Он решает проблему кратчайшего расстояния от одной начальной точки до других остальных точек графа.

Естественно, в конечном счете, все методы оптимизации реализуются с помощью численных методов и компьютерных программ, написанных на одном из языков программирования. Например, на C++, Java, Python, MATLAB, и др.

В качестве примера применения MATLAB для решения задач оптимизации перевозок, можно указать работы [18–20].

### **3. Оптимизация грузовых перевозок на примере Витебской области Республики Беларусь**

Решение задач маршрутизации транспортных средств и задачи кратчайшего пути с учетом остаточных ресурсов транспортных

средств, рассмотрим на примере некоего, виртуального транспортного предприятия, находящегося в Витебской области Республики Беларусь. Задачу оптимизации маршрутов решим с помощью метода Дейкстры. Для этого нами написан код в среде MATLAB, который используя исходные данные, выдает тип транспортных средств, которые должны быть использованы для выполнения заказов на доставку груза, маршрут и стоимость перевозок. Все это выполняется из условия минимума расходов на доставку груза, и с учетом остаточных ресурсов транспортных средств, имеющихся в транспортном предприятии.

На рисунке 1 представлена карта Витебской области [21] и неориентированный граф, составленный из 12 населенных пунктов данной области. Количество пунктов не принципиально. Они взяты только для демонстрации работоспособности нашего кода. Они могут быть масштабированы на большое количество пунктов. В данной задаче ребрами графа являются расстояния между соседними вершинами графа (т. е. населенными пунктами). Таким образом, нам достаточно знать только расстояния между соседними вершинами. Например, необходимо знать расстояние между Витебском и Полоцком, и между Витебском и Сенно. Но нет необходимости знать расстояния от Витебска до остальных пунктов.

Расстояния между вершинами графа (населенными пунктами) представлены в таблице 1.



Рисунок 1 – Граф из вершин (населенных пунктов) Витебской области

Пусть в транспортном предприятии имеются транспортные средства (ТС), представленные в таблице 2.

Таблица 1 – Расстояние между пунктами (км) [22,23]

№	Наименование населенного пункта	1 Витебск	2 Полоцк	3 Ушачи	4 Лепель	5 Докшицы	6 Глубокое
1	Витебск	0	103	0	0	0	0
2	Полоцк	103	0	45	0	0	84
3	Ушачи	0	45	0	38	0	0
4	Лепель	0	0	38	0	0	0
5	Докшицы	0	0	0	0	0	31
6	Глубокое	0	84	0	0	31	0
7	Сенно	62	0	0	78	0	0
8	Поставы	0	0	0	0	0	60
9	Шарковщина	0	0	0	0	0	32
10	Бегомль	0	0	0	53	28	0
11	Браслав	0	0	0	0	0	0
12	Верхнедвинск	0	70	0	0	0	0

Продолжение таблицы 1

№	Наименование населенного пункта	7 Сенно	8 Поставы	9 Шарковщина	10 Бегомль	11 Браслав	12 Верхнедвинск
1	Витебск	62	0	0	0	0	0
2	Полоцк	0	0	0	0	0	70
3	Ушачи	0	0	0	0	0	0
4	Лепель	78	0	0	53	0	0
5	Докшицы	0	0	0	28	0	0
6	Глубокое	0	60	32	0	0	0
7	Сенно	0	0	0	0	0	0
8	Поставы	0	0	0	0	82	0
9	Шарковщина	0	0	0	0	48	0
10	Бегомль	0	0	0	0	0	0
11	Браслав	0	82	48	0	0	76
12	Верхнедвинск	0	0	0	0	760	0

Для максимального приближения модельных расчетов к реальности, нами взяты транспортные средства с реальными техническими

характеристиками. Эти характеристики взяты из [24]. Но значения остаточного ресурса, конечно, взяты к примеру.

Таблица 2 – Транспортные средства и их некоторые технические характеристики

№	Название	Грузо-подъемность, т	Расход топлива на 100 км, л	Расходы на 1 км, бел. руб./км	Остаточный ресурс, км
1	МАЗ 437041-269 (бортовой)	5,15	18	0,36	800
2	FAW CA5167XXYP11K2L7 (фургон)	8	20	0,40	400
3	МАЗ 5340 (бортовой)	9,6	29	0,58	700
4	MAN 19 (фургон)	10	20	0,40	1000
5	МАЗ-630300 2121 (бортовой с тентом)	12,7	25	0,50	1100
6	Volvo FH12 (бортовой с тентом)	16,5	24	0,48	2000
7	Scania R124	15	23	0,46	90
8	DAF XF95 series	20	34	0,68	1500
9	Mercedes-Benz 2543 (бортовой)	15	23	0,46	300
10	DAF 95XF430 (фургон)	15	25	0,50	200

Хотя при расчете стоимости грузоперевозок учитывается множество факторов (расходы на топливо, амортизация автотранспорта, затраты на страхование автомобиля, зарплата водителю, страхование груза и так далее), здесь мы в целях сравнительного анализа, берем в расчет только расходы на топливо. Пусть цена дизельного топлива: 2 белорусского рубля/литр.

Допустим, в предприятие поступили заказы на доставку груза, представленные в таблице 3.

Задача оптимизации перевозок с учетом остаточных ресурсов, решаются в следующей последовательности:

- определение оптимального маршрута для каждого заказа, с указанием последовательности пунктов, через которых будет проходить маршрут, и расстояние от начального пункта до конечного (в километрах). Для этого используется метод Дейкстры;

- выбор ТС для выполнения каждого заказа, исходя из грузоподъемности и расходов на перевозку на 1 км;

– если остаточный ресурс выбранного ТС недостаточно для выполнения данного заказа (т. е. остаточный ресурс меньше чем расстояние до конечного пункта), то выдается сообщение об этом, и производится поиск другого ТС с достаточной грузоподъемностью и остаточными ресурсами. Но из всех ТС, которые удовлетворяют этим требованиям, берется ТС с наименьшими расходами. Если такое ТС не будет найдено, то будет выдано сообщение, что заказ с данным номером не будет выполнено. В этом случае, администратор логистики назначает на это ТС очередное техническое обслуживание, после которого данное ТС будет иметь увеличенные остаточные ресурсы;

– после того как на все заказы будут назначены ТС, для каждого заказа будут вычислены КИГ – коэффициенты использования грузоподъемности, по формуле:  $КИГ = m/g$ , где  $m$  – масса перевозимого груза,  $g$  – грузоподъемность ТС;

– формирование итогового отчета.

Таблица 3 – Заказы на доставку груза

№	Масса груза, т	Начальный пункт (номер)	Конечный пункт (номер)
1	4	Витебск (1)	Глубокое (6)
2	14	Витебск (1)	Браслав (11)
3	16	Витебск (1)	Поставы (8)
4	11	Витебск (1)	Ушачи (3)
5	7	Верхнедвинск (12)	Бегомль (10)
6	3	Полоцк (2)	Бегомль (10)
7	18	Сенно (7)	Браслав (11)

В результате выполнения нашей программы получены следующие результаты.

Информация о недостаточности остаточных ресурсов для выполнения заказов:

– для заявки № 1 ТС № 7 требуется тех. обслуживание: ост. ресурс = 90 км;

– для заявки № 2 ТС № 7 требуется тех. обслуживание: ост. ресурс = 90 км;

– для заявки № 2 ТС № 10 требуется тех. обслуживание: ост. ресурс = 200 км;

- для заявки № 3 ТС № 7 требуется тех. обслуживание: ост. ресурс = 90 км;
- для заявки № 3 ТС № 10 требуется тех. обслуживание: ост. ресурс = 200 км;
- для заявки № 4 ТС № 7 требуется тех. обслуживание: ост. ресурс = 90 км;
- для заявки № 5 ТС № 7 требуется тех. обслуживание: ост. ресурс = 90 км;
- для заявки № 5 ТС № 10 требуется тех. обслуживание: ост. ресурс = 200 км;
- для заявки № 6 ТС № 7 требуется тех. обслуживание: ост. ресурс = 90 км;
- для заявки № 7 ТС № 7 требуется тех. обслуживание: ост. ресурс = 90 км;
- для заявки № 7 ТС № 10 требуется тех. обслуживание: ост. ресурс = 200 км.

Итоговый отчет представлен ниже.

1. Заказ № 1. ТС № 1. Расходы = 67,32 руб. Путь = 187 км. КИГ = 0,78.

Маршрут: 1 (Витебск) → 2 (Полоцк) → 6 (Глубокое).

2. Заказ № 2. ТС № 9. Расходы = 114,54 руб. Путь = 249 км. КИГ = 0,93.

Маршрут: 1 (Витебск) → 2 (Полоцк) → 12 (Верхнедвинск) → 11 (Браслав).

3. Заказ № 3. ТС № 6. Расходы = 118,56 руб. Путь = 247 км. КИГ = 0,97.

Маршрут: 1 (Витебск) → 2 (Полоцк) → 6 (Глубокое) → 8 (Поставы).

4. Заказ № 4. ТС № 10. Расходы = 74 руб. Путь = 148 км. КИГ = 0,73.

Маршрут: 1 (Витебск) → 2 (Полоцк) → 3 (Ушачи).

5. Заказ № 5. ТС № 4. Расходы = 82,40 руб. Путь = 206 км. КИГ = 0,70.

Маршрут: 12 (Верхнедвинск) → 2 (Полоцк) → 3 (Ушачи) → 4 (Лепель) → 10 (Бегомль).

6. Заказ № 6. ТС № 2. Расходы = 54,40 руб. Путь = 136 км. КИГ = 0,37.

Маршрут: 2 (Полоцк) → 3 (Ушачи) → 4 (Лепель) → 10 (Бегомль).

7. Заказ № 7. ТС № 8. Расходы = 183,60 руб. Путь = 270 км. КИГ = 0,90.

Маршрут: 7 (Сенно) → 4 (Лепель) → 10 (Бегомль) → 5 (Докшицы) → 6 (Глубокое) → 9 (Шарковщина) → 11 (Браслав).

Таким образом, оказалось, что ТС № 7 и ТС № 10 для некоторых заказов не имеют достаточного остаточного ресурса. Но ТС № 10 имеет необходимые ресурсы, и оно отправлено на выполнение заказа № 4, т. е. если ТС не имеет достаточного ресурса для одного заказа, он может быть достаточным для выполнения другого заказа. Но все равно это информация выдается, чтобы принимать определенные управленческие решения относительно данного ТС.

Итоговый отчет показывает, что заказы могут быть выполнены из любого пункта в любой пункт, а не только из первого пункта. Конечно, будем считать, что в этих пунктах имеются необходимое ТС.

## **Заключение**

Таким образом, результаты численных расчетов показывают, что предложенный нами алгоритм полностью решает поставленную задачу оптимизации перевозок с учетом остаточных ресурсов. Несмотря на то, что приведенные здесь результаты являются результатами примерных, модельных расчетов, они основаны на абсолютно реальных на сегодняшний день характеристиках транспортных средств, и расходах перевозки. Конечно, как было отмечено выше, обычно при расчете стоимости грузоперевозок учитывается множество факторов. Но здесь мы в целях сравнительного анализа, в расчет взяли только расходы на топливо. Остальные расходы довольно просто могут быть включены в таблицу 2. От этого алгоритм не изменится.

Цель данной работы не состояло в создании полноценного, коммерческого программного обеспечения для использования в логистическом предприятии. Хотя результаты данной работы вполне можно использовать для создания такого программного обеспечения. Естественно, для этого необходимо расширить функциональную возможность данной программы с учетом особенностей конкретного предприятия. Но уже в таком виде данный код можно адаптировать в конкретное предприятие и использовать его как инструмент принятия решения при выполнении заказов на доставку грузов.

В будущем планируется внедрить данный алгоритм и программный код в одно из предприятий Республики Беларусь или Республики Казахстан.

## Литература

1. Allaire, G., Craig, A. Numerical Analysis and Optimization: An Introduction to Mathematical Modelling and Numerical Simulation. Cary, NC, USA : Oxford University Press 2007. – P. 294.

2. Rangaiah, G. P. Stochastic Global Optimization: Techniques and Applications in Chemical Engineering. – Singapore, World Scientific, 2010.

3. Yang, X.-Sh. Introduction to Mathematical Optimization: From Linear Programming to Metaheuristics. – Cambridge, GBR : Cambridge International Science Publishing. 2008. – P. 3–79.

4. Arora, J. S. Optimization of Structural and Mechanical Systems. Hackensack, NJ, World Scientific. 2007.

5. Chen, D.-S., Batson, R. G., Dang, Y. Applied Integer Programming Modeling and Solution. – Hoboken, NJ, USA : Wiley 2011. – P 3–7.

6. Mishra, D. N., Agarwal, S. K. Operation Research. – Lucknow, IND: Global Media 2009. – P. 107.

7. Williams, H. P. Model Building in Mathematical Programming (5<sup>th</sup> Edition). Somerset, NJ, USA: Wiley 2013. P. 109–220.

8. Jarboui, B., Siarry, P., Teghem, J. Metaheuristics for Production Scheduling. – Somerset, NJ, USA : Wiley-ISTE 2013. P. 373–433.

9. Yalaoui, A., Chehade, H., Yalaoui, F., Amodeo, L. Optimization of Logistics. – Wiley-ISTE, 2013.

10. Mastorakis, N. E. Computer Science, Technology and Applications : Pathway Modeling and Algorithm Research. New York, NY, USA : Nova Science Publishers, Inc. 2011. – P. 46.

11. Daskin, M. S. Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications (2-nd Edition). – Somerset, NJ, USA : Wiley 2013. – P. 3–66.

12. Ore, O., Wilson, R. J. Anneli Lax New Mathematical Library, Volume 34 : Graphs and Their Uses. – Washington, DC, USA : Mathematical Association of America, 1990. – P. 33.

13. Волков, В. С., Буторин, Т. А., Филатов, Г. М. Повышение эффективности грузовых автомобильных перевозок // Современные

проблемы науки и образования. 2013. №5.; URL : <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=10165> (дата обращения : 17.06.2021).

14. Stet, M. Methods for determination and optimization of logistics costs. – SEA – Practical Application of Science. Volume IV, Issue 3(12). 2016. P. 507–511.

15. Hayder, H., Adeel, A., Mourad, B., Cyril, F. Logistics optimization using ontologies. Proceedings of ICCSA 2014, Jun 2014, Le Havre, France. fhal-01651950ff.

16. Friedrich, H., Gumpp, J. Simplified modeling and solving of logistics optimization problems. International Journal of Transportation. Vol. 2, No. 1. 2014. pp.33–52, <http://dx.doi.org/10.14257/ijt.2014.2.1.03>.

17. Ding, D., Zou, X. The optimization of logistics distribution route based on Dijkstra's algorithm and C-W saving algorithm. 6-th International Conference on Machinery, Materials, Environment, Biotechnology and Computer (MMEBC 2016). 2016. – P. 956–965.

18. Kay, M. G. Matlog: logistics engineering using Matlab. Suleyman Demirel University Journal of Engineering Sciences and Design. 2016. – 4(1). – P. 15–20.

19. Чертков, А. А., Вардомская, А. А., Дмитриев, А. А. Рекурсивный метод оптимизации логистических путей средствами МАТЛАБ // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – Выпуск 6 (34). – 2015. – С. 196–204.

20. Сахаров, В. В., Чертков, А. А., Дмитриев, А. А. Алгоритм трафика перевозки грузов с обеспечением минимума транспортной работы // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – Выпуск 1 (35). – 2016. С. 180–188.

21. URL : <http://bigkarta.ru/belarus/belarus-map.png> (дата обращения : 17.06.2021).

22. URL : <https://flagma.by/rasstoyanie-ot-brestbelar-do.html> (дата обращения : 17.06.2021).

23. URL : <https://www.avtodispatcher.ru/distance/table/c59065-belarus%27/> (дата обращения : 17.06.2021).

24. URL : <https://logists.by/library/reference/razmery-gruzovyh-mashin> (дата обращения : 17.06.2021).

Статья поступила 22.09.2021

## **АНАЛИЗ НАГРУЖЕННОСТИ ТРАНСМИССИИ ПОЛНОПРИВОДНОГО ТРАКТОРА ТЯГОВОГО КЛАССА 3 ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРЕОДОЛЕНИЯ ПРЕПЯТСТВИЙ С ПЛУГОМ**

**Сониц О. А.**<sup>1</sup>, инж.-мех., **Сидоров С. А.**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
**Дрозд И. А.**<sup>2</sup>, инж.-мех.,

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, г. Минск,  
Республика Беларусь, e-mail: [osonich@bntu.by](mailto:osonich@bntu.by), [ssidorov@bntu.by](mailto:ssidorov@bntu.by),

<sup>2</sup>ОАО «Минский тракторный завод»,  
г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: [drozdigor2@mail.ru](mailto:drozdigor2@mail.ru)

## **ANALYSIS OF THE LOAD OF THE TRANSMISSION OF THE TRACTOR OF CLASS 3 WHEN MODELING OVERCOMING OBSTACLES WITH THE PLOW**

**O. Sonich**<sup>1</sup>, engineer-mechanic,  
**S. Sidaraw**<sup>1</sup>, Ph.D. in Engineering, Associate professor,  
**I. Drozd**<sup>2</sup>, engineer-mechanic,

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus,  
e-mail: [osonich@bntu.by](mailto:osonich@bntu.by), [ssidorov@bntu.by](mailto:ssidorov@bntu.by),

<sup>2</sup>OJSC "Minsk Tractor Works", Minsk, Belarus,  
e-mail: [drozdigor2@mail.ru](mailto:drozdigor2@mail.ru)

*Предложена модель трансмиссии полноприводного трактора в программном пакете LMS Imagine.Lab AMESim, являющаяся основой для изучения взаимосвязей между динамикой колесной машины, сцеплением на мягкой почве и трансмиссией. Модель включает под-модели источника крутящего момента, коробки передач, переднего и заднего ведущих мостов, межколесного и межосевого дифференциалов, карданных шарниров и колес. Модель предназначена для исследования нагрузок, возникающих в деталях трансмиссии при дви-*

жении колесного трактора на подъем или спуск при различных дорожных условиях. Проведен анализ нагруженности элементов трансмиссии.

Ключевые слова: трактор, трансмиссия, дифференциал, нагруженность, моделирование.

*The transmission model of an all-wheel drive tractor is designed in the LMS Imagine.Lab AMESim software package, is to starting point for exploring the interactions between wheel vehicle dynamics, traction on soft soil and the transmission. The model is includes submodels of the source of torque, gearbox, front and rear driving axles, inter-wheel and interaxle differentials, cardan joints and wheels. The model is designed to investigate the loads in the transmission parts when the wheeled tractor moves on a rise or descent under various road condition. The analysis of the load of parts of transmission is carried out.*

Key words: tractor, transmission, differential, load, modeling.

## **Введение**

Колесная машина представляет собой сложную динамическую систему, состоящую из ряда масс, соединенных между собой с помощью упругих соединений. Все узлы и соединения в процессе работы подвергаются определенным воздействиям от двигателя и дорожных условий, в результате чего возникают дополнительные перемещения отдельных деталей и узлов кроме тех, которые предусматриваются при проектировании. Такие перемещения происходят периодически и оказывают вредное воздействие на прочность и долговечность деталей и узлов силовой передачи, а тем самым на прочность и долговечность всей динамической системы. Полное исследование всех колебательных процессов, происходящих в колесной машине, трудно осуществить на практике. В связи с этим используются различные методы анализа системы транспортного средства [1].

Имитационное моделирование позволяет проработать на моделях большое количество дорожных ситуаций и вариантов конструкции и испытать их в стендовых условиях. Для имитационного моделирования в основном используется пакет Matlab/Simulink, обладающий большими возможностями решения нестандартных ситуаций и задания внешнего возмущения [2].

## Анализ нагруженности трансмиссии трактора

Работниками научно-исследовательской и испытательной лаборатории транспортных средств и кафедры «Автомобили» Белорусского национального технического университета разработана имитационная модель трансмиссии полноприводного колесного трактора (рисунок 1) [3].

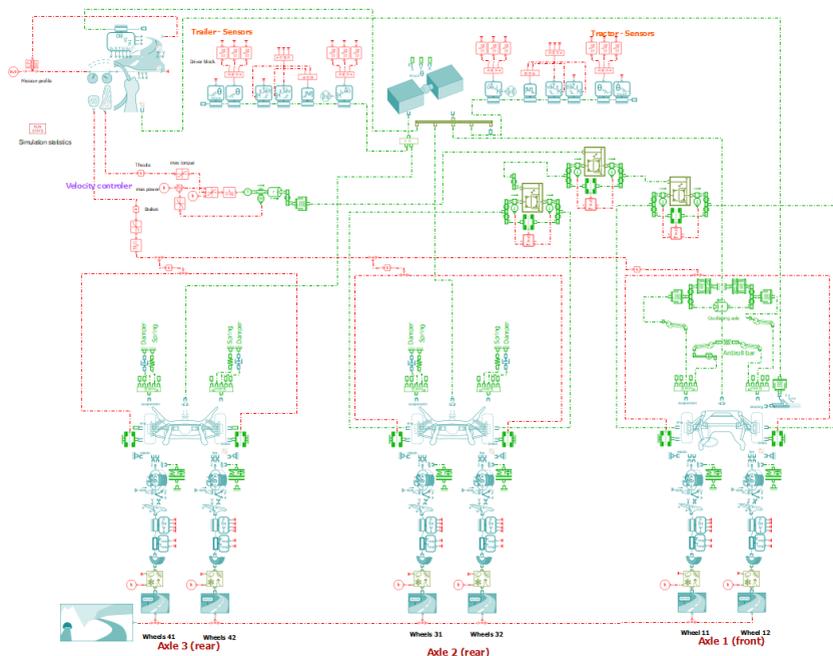


Рисунок 1 – Модель трансмиссии трактора

Модель отражает взаимодействия между двигателем, трансмиссией, шасси и шинами, которые возможно зафиксировать с помощью программного пакета LMS Imagine.Lab AMESim. Преимуществами данного пакета является достаточно обширная библиотека встроенных компонентов, представляющих модели узлов и агрегатов машин, что позволяет быстро создавать и рассчитывать поведение сложных мехатронных систем, возможность создания интуитивно понятного эскиза модели с помощью интерактивного графического

интерфейса, а также возможность взаимодействия с другими программами, например, MATLAB Simulink [4]. В качестве примера показан трактор с плугом по поверхности с неровностями высотой от +5 см до –5 см и длиной волны, примерно вдвое превышающей колесную базу. Такая модель является основой для изучения взаимосвязей между динамикой трактора, сцеплением на мягкой почве и трансмиссией.

Как известно, повышение силы тяги в наиболее распространенных случаях добиваются блокировкой межосевых и межколесных дифференциальных механизмов. Однако, как показали исследования, это приводит к ухудшению динамических и тормозных свойств машины [5].

В ходе разработки математической модели определены основные показатели, изменяя которые можно добиться результатов в зависимости от поставленной задачи, будь то исследование нагруженности трактора на ровной поверхности или при работе в поле, как в составе агрегируемой машины, так и отдельно.

В результате проведенного расчета машинотракторного агрегата – трактора и плуга, получены следующие результаты, графики которых представлены на рисунках 2–12.

Графики вертикальных нагрузок на шины во время движения в полевых условиях и перепадах высот в 6 градусов (рисунок 2), во время прохождения симуляции из которого отчетливо видно, что наибольшую нагрузку принимают задние колеса трактора.

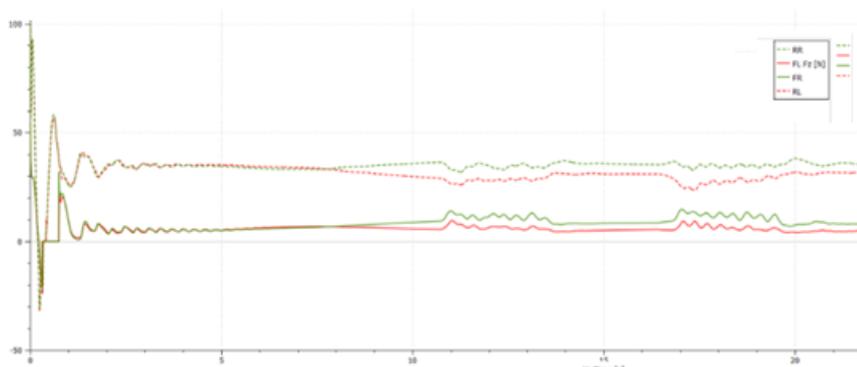


Рисунок 2 – Вертикальные нагрузки на шины

Исходя из полученных результатов, нагрузки на передние шины составляют в среднем 10 кН и колеблются в пределах от 5 до 15 кН·м, в то время как нагрузка на задние шины составляет в среднем 30 кН·м и колеблется от 20 до 35 кН·м.

Графики траектории колес показывают на сколько отклоняется каждое из колес от заданной траектории во время прохождения симуляции при работе в полевых условиях и реакции на неровности (рисунок 3).

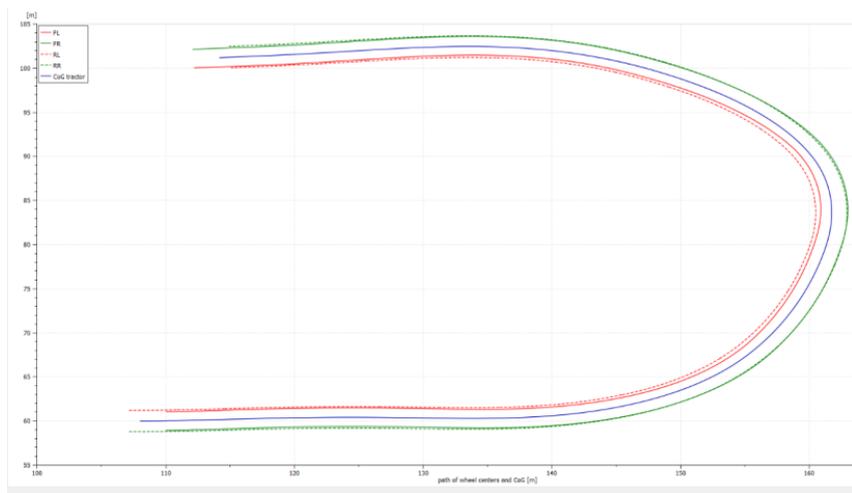


Рисунок 3 – Траектория колес

Скоростные показатели (рисунок 4) отражают изменение скорости вращения колес и скорость вращения двигателя во время прохождения симуляции.

Одним из источников динамических моментов в трансмиссии является двигатель (рисунок 5). Значение крутящего момента двигателя определялось с учетом условий движения: траектория, скорость, опорная поверхность [6].

Исходя из полученного графика можно выделить, что для поддержания средней скорости работы в поле 2,5 м/с двигатель развивает 1,2 кН·м крутящего момента и изменяется в пределах от 1 до 4 кН·м.

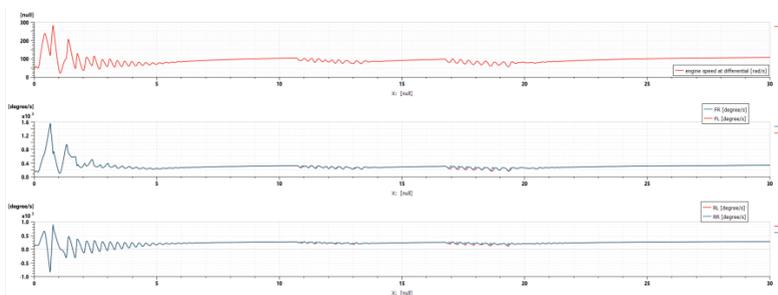


Рисунок 4 – Скоростные показатели

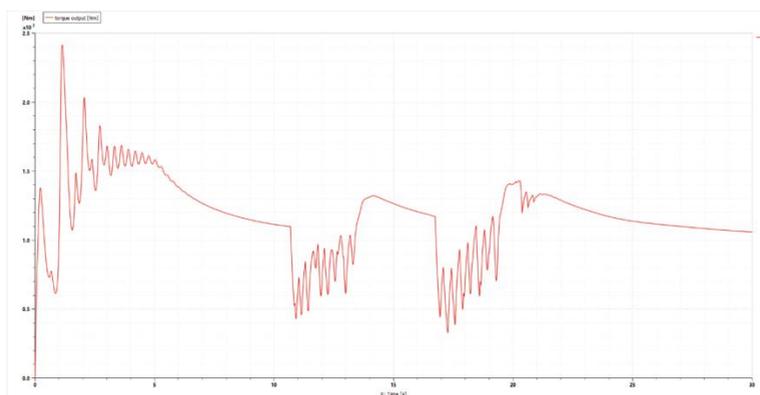


Рисунок 5 – Крутящий момент двигателя

На рисунке 6 представлены нагрузки непосредственно на зубчатых колесах главной передачи.

В среднем на главной передаче нагрузки достигают 21 кН·м и колеблются в пределах от 10, до 40 кН·м.

На рисунке 7 представлены нагрузки, приходящие на дифференциал переднего моста.

На рисунке 8 представлены нагрузки, приходящие на дифференциал заднего моста.

По полученным результатам можно выделить, что на дифференциал переднего моста в среднем приходится 6 кН·м крутящего момента, в то время как на задний – 17 кН·м, при колебаниях от 2 до 10 кН·м и от 10 до 30 кН·м соответственно.

На рисунке 9 представлены нагрузки, возникающие в левом и правом бортовом редукторе переднего моста во время прохождения симуляции.

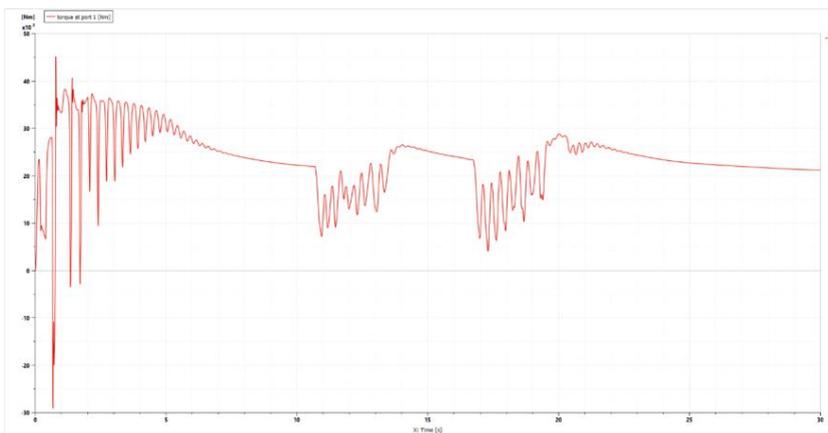


Рисунок 6 – Нагрузки на главной передаче

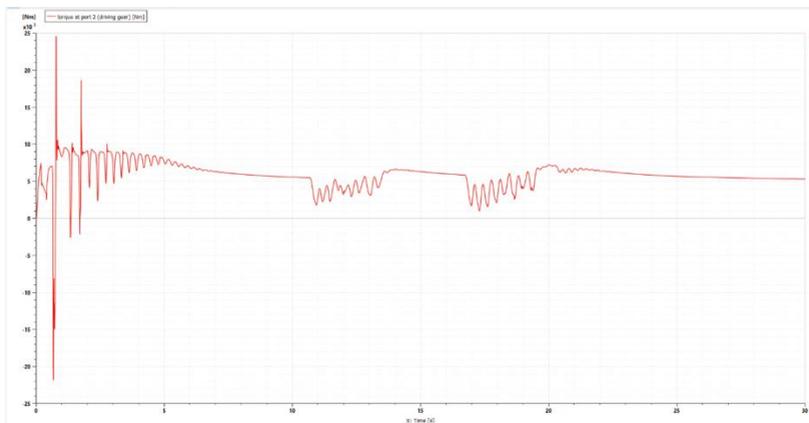


Рисунок 7 – Нагрузки на дифференциале переднего моста

По полученным графикам можно наблюдать, что нагрузки в бортовых редукторах переднего моста в среднем составляют 3 кН·м, однако по мере совершения поворота, можно отчетливо заметить, что большую нагрузку получают левые колеса, т. к. в работу включается дифференциал, распределяющий крутящий момент в связи с чем

крутящий момент на левом колесе колеблется от 1 до 5 кН·м, в то время как на правом периодически опускается до 0.

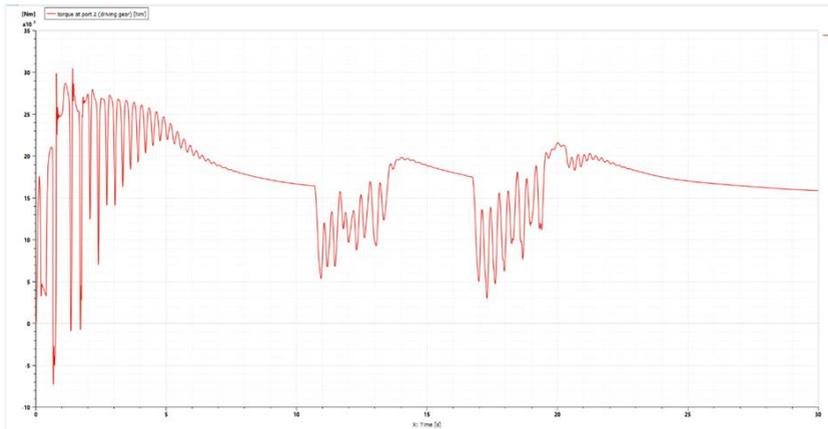


Рисунок 8 – Нагрузки на дифференциале заднего моста

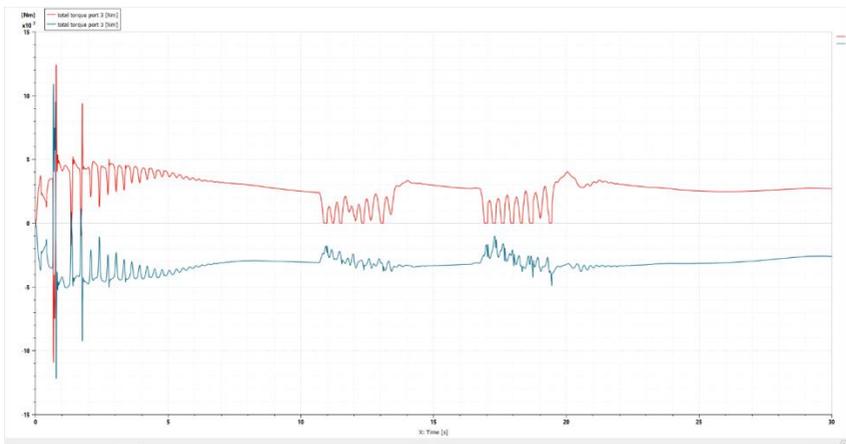


Рисунок 9 – Нагрузки в бортовых редукторах переднего моста

На рисунке 10 представлены нагрузки, возникающие в левом и правом бортовом редукторе заднего моста во время прохождения симуляции.

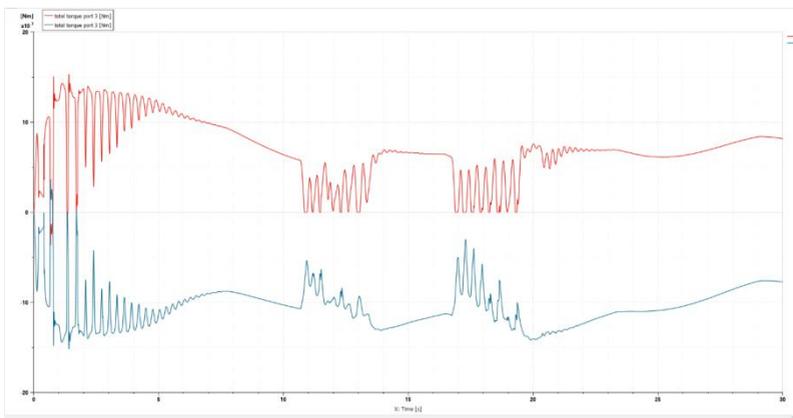


Рисунок 10 – Нагрузки в бортовых редукторах заднего моста

Примерно такая же картина наблюдается и на бортовых редукторах заднего моста, только в данном случае средняя нагрузка на левом редукторе составляет 10 кН·м, в то время как на правом – 7 кН·м, и колеблется в пределах от 5 до 14 кН·м и от 0 до 7 кН·м соответственно.

На рисунке 11 представлены нагрузки, приходящие на левое и правое колеса переднего моста.

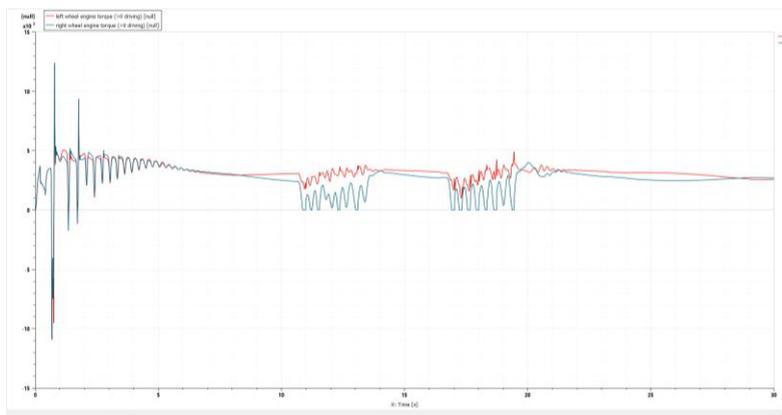


Рисунок 11 – Нагрузки колес переднего моста

На рисунке 12 представлены нагрузки, приходящие на левое и правое колеса заднего моста.

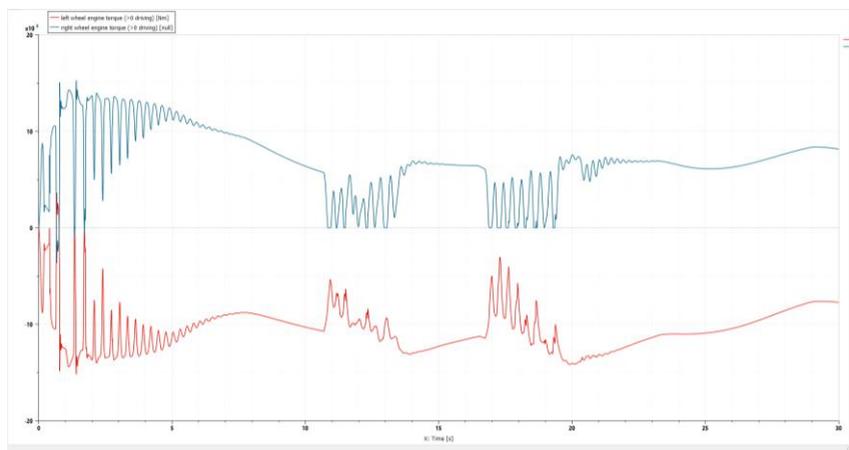


Рисунок 12 – Нагрузки колес заднего моста

В результате исследования нагруженности колес переднего и заднего моста мы, как и ожидалось, видим подобную ситуацию, что и с бортовыми редукторами, за тем исключением, что бортовой редуктор понижает крутящий момент, который на переднем мосту в среднем колеблется в пределах от 2 до 5 кН·м и от 0 до 4 кН·м на левом и правом колесах соответственно. В то время как на колесах заднего моста нагрузки на левом колесе в среднем достигают 10 кН·м, а на правом 7 кН·м и колеблются в пределах от 3 до 14 кН·м и от 0 до 7 кН·м соответственно.

## Выводы

Проведенное моделирование движения трактора при преодолении препятствия показало значительное превышение нагруженности элементов заднего моста в сравнении с передним. Для предохранения элементов заднего ведущего моста от преждевременного выхода из строя предлагается установка специальных устройств, снижающих пиковые нагрузки в трансмиссии. Одним из возможных вариантов является установка предохранительных фрикционных муфт.

Рекомендуется дальнейшее проведения исследований нагруженности трансмиссии тракторов различных тяговых классов.

## Литература

1. Микулик, Н. А. Основы теории динамических систем транспортных средств: монография / Н. А. Микулик. – Мн. : БНТУ, 2007. – 218 с.

2. Михайлов, В. Г. Компьютерное и имитационное моделирование автомобиля : монография по специальности 05.05.03 / В. Г. Михайлов. – Минск : 2020. – 315 с.

3. Дрозд, И. А. Имитационная модель трансмиссии полноприводного трактора тягового класса 3 с прицепом при преодолении препятствий // И. А. Дрозд, О. А. Сонич, С. А. Сидоров. – Автомобили и тракторостроение. Материалы Международной научно-практической конференции. В 2 томах. Том 1. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 202–206.

4. Гимадиев, А. Г. LMS Imagine.Lab AMESim как эффективное средство моделирования динамических процессов в мехатронных системах [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / А. Г. Гимадиев, П. И. Грешняков, А. Ф. Синяков; – Электрон. текстовые и граф. дан. (4,8 Мбайт). – Самара : Изд-во СамНЦ РАН, 2014.

5. Сазонов, И. С. Динамика колесных машин / И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. Ун-т, 2006. – 462 с.

6. Сидоров, С. А. Анализ нагруженности дифференциалов трансмиссии полноприводного трактора тягового класса 3 при моделировании преодоления препятствий с плугом // С. А. Сидоров, О. А. Сонич, И. А. Дрозд. Наземные транспортно-технологические комплексы и средства: материалы международной научно-технической конференции / под общ. ред. Ш. М. Мерданова. – Тюмень : ТИУ, 2021. – С. 232–237.

7. Скойбеда, А. Т. Автоматизация ходовых систем колесных машин / А. Т. Скойбеда. – Мн. : Наука и техника, 1979. – 280 с.

8. Альгин, В. Б. Динамика трансмиссии автомобиля и трактора / В. Б. Альгин, В. Я. Павловский, С. Н. Поддубко; под ред. чл.-кор. АН БССР И. С. Цитовича. – Минск : Наука и техника, 1986. – 216 с.

Статья поступила 12.10.2021

## ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ВПУСКНЫХ КАНАЛОВ ШЕСТИЦИЛИНДРОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРОИЗВОДСТВА МИНСКОГО МОТОРНОГО ЗАВОДА

*Кухаренок Г. М.*<sup>1</sup>, д-р. техн. наук, проф.; *Предко А. В.*<sup>2</sup>, инж.,

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: *kux@tut.by*,

<sup>2</sup>ОАО «Управляющая компания холдинга «Минский моторный завод», г. Минск, Республика Беларусь,  
e-mail: *MMZ.UGK.NS@yandex.by*

## ESTIMATION OF THE PARAMETERS OF INLET CHANNELS OF SIX-CYLINDER ENGINES MANUFACTURED BY MINSK MOTOR PLANT

*G. Kukhareнок*<sup>1</sup>, Doctor of Engineering Science, Professor,  
*A. Predko*<sup>2</sup>, engineer

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus,  
e-mail: *kux@tut.by*,

<sup>2</sup>The OJSC “MINSK MOTOR PLANT” Holding Managing Company”,  
Minsk, Belarus, e-mail: *MMZ.UGK.NS@yandex.by*

*С целью проверки возможности унификации отливок головок газопоршневого двигателя MMZ-262CNG и дизеля Д-262 проведена сравнительная оценка параметров впускных каналов указанных двигателей. Оценка пропускной способности каналов и интенсивности воздушного вихря проводилась по результатам статической продувки впускных каналов газообмена на виртуальной установке путем моделирования потоков. Моделирование потоков проводилось при высотах подъема клапана  $h_{кл} = 2-13$  мм, одинаковых граничных условиях – давление и температура на входе  $P_{вх} = 101325$  Па,  $T_{вх} = 293,2$  К; на выходе  $P_{вых} = 100304$  Па,  $T_{вых} = 293,2$  К. В качестве*

основных параметров, характеризующих свойства каналов, приняты эффективное проходное сечение канала  $\mu_f$  и вихревое отношение  $\Omega$ . Проведена верификация модели путем сравнения результатов виртуальной и натурной продувок впускных каналов. Выявлена удовлетворительная сходимость результатов виртуального и натурального эксперимента. В результате моделирования определено, что впускные каналы двигателя MMZ-262CNG обладают более низкой пропускной способностью, на 17 % при  $h_{кл} = 13$  мм, и повышенной способностью к генерации вихревого движения воздушного заряда в цилиндре дизеля, на 18 % за такт впуска. Проведен анализ структуры потока воздуха по сечениям впускного канала MMZ-262CNG. В результате анализа обнаружена область паразитного завихрения потока, являющаяся причиной снижения пропускной способности и повышенного сопротивления канала. Сделано заключение о невозможности прямого использования впускных каналов MMZ-262CNG в дизеле Д-262.

Ключевые слова: впускной канал, расход воздуха, эффективное проходное сечение, коэффициент закрутки, линии тока, моделирование потоков, статическая продувка.

*In order to test the possibility of unifying the castings of the heads of the MMZ-262CNG gas piston engine and the D-262 diesel engine, a comparative assessment of the parameters of the inlet channels of these engines was carried out. The estimation of the channel throughput and the intensity of the air swirl was carried out according to the results of static blowing of the gas exchange inlet channels on a virtual installation by modeling the flows. Simulation of flows was carried out at valve lift heights  $h_{кл} = 2-13$  mm, the same boundary conditions – pressure and temperature at the inlet  $P_{вх} = 101325$  Pa,  $T_{вх} = 293,2$  K; at the outlet  $P_{вых} = 100304$  Pa,  $T_{вых} = 293,2$  K. The effective flow area of the channel  $\mu_f$  and the swirl ratio  $\Omega$  are taken as the main parameters characterizing the properties of the channels. The model was verified by comparing the results of virtual and real blowing of inlet channels. A satisfactory convergence of the results of the virtual and real experiments was revealed. As a result of the simulation, it was determined that the intake channels of the MMZ-262CNG engine have a lower throughput, by 17 % at  $h_{кл}=13$  mm, and an overestimated ability to generate a swirl motion of an*

*air charge in a diesel cylinder, by 18 % per intake stroke. The analysis of the structure of the air flow along the area of the MMZ-262CNG inlet channel has been carried out. As a result of the analysis, an area of parasitic flow vortex was found, which became the reason of a decrease in the throughput and an increase in the hydraulic resistance of the channel. It was concluded that direct use of MMZ-262CNG inlets in the D-262 diesel engine is impossible.*

*Key words: inlet channel, air flow rate, effective flow area, swirl ratio, streamlines, flow simulation, static blowdown.*

## **Введение**

От количества и параметров состояния воздушного заряда, находящегося в цилиндре зависят эффективность процессов смесеобразования и сгорания, и как следствие индикаторные и эффективные показатели двигателя [1, 2]. Для организации высокоэффективного процесса сгорания дизельного [2, 3] и газопоршневого [4] двигателей необходимо создание направленного движения воздушного заряда требуемой интенсивности. Степень соответствия интенсивности вихревого движения заряда оказывает на рабочий процесс значительное воздействие, согласно работе [2] в дизельном двигателе «несоответствие топливных факелов и интенсивности вихря ведет к снижению мощности до 25 %». От аэродинамического сопротивления впускных каналов зависит наполняемость цилиндров свежим рабочим телом, воздухом для дизелей и горючей смесью в случае газопоршневого двигателя с внешним смесеобразованием, и как следствие максимальная мощность, развиваемая двигателем [3, 5]. Вопрос совершенствования впускных каналов являются актуальной проблемой двигателестроения [6, 7].

## **Объекты исследования**

В линейке шестицилиндровых двигателей, выпускаемых ОАО «УКХ «ММЗ», находятся дизели семейств Д-260, Д-262 и газопоршневые двигатели MMZ-262CNG. Газопоршневой двигатель разработан на базе дизеля Д-262. По условиям компоновки топливной аппаратуры разработана новая конструкция головки цилиндров с впускными каналами имеющими боковой вход.

Объектами исследования являются впускные каналы газопоршневого и дизельного двигателей размерности 110×140 мм.

Впускные каналы имеют существенные конструктивные различия: входные отверстия у каналов головки MMZ-262CNG боковые, со стороны расположения свечей зажигания, и индивидуальные; у каналов головки Д-262 входы выполнены вертикально, причем каналы 2 и 3 цилиндров имеют общий вход.

Диаметры горловины каналов и параметры клапанной щели у обоих двигателей идентичны. 3D модели головок взяты из документации MMЗ.

Общий вид проточных частей впускных каналов представлены на рисунке 1.

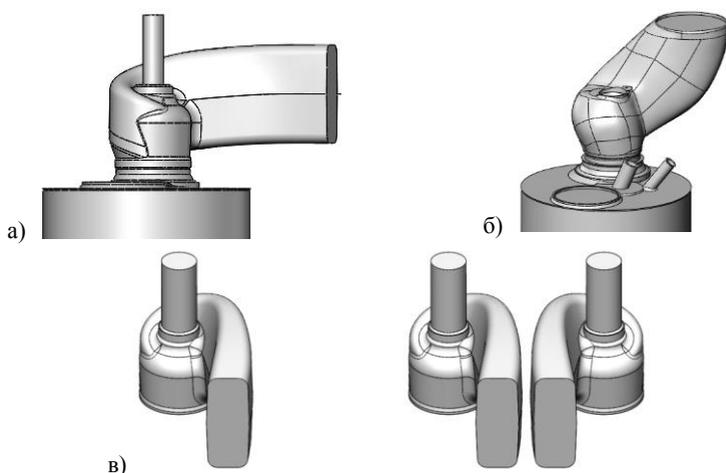


Рисунок 1 – Проточные части впускных каналов двигателей  
а) MMZ-262CNG; б) Д-262; в) расположение каналов в головке  
двигателя MMZ-262CNG

## Методика определения аэродинамических свойств впускных каналов

Определение свойств каналов проводилось на «виртуальном» продувочном стенде (рисунок 2) с использованием FloFD приложения, позволяющем моделировать течение вязкой теплопроводящей жидкости [8, 9, 10].

Моделирование потоков проводилось при высотах подъема клапана  $h_{кл} = 2-13$  мм, одинаковых граничных условиях – давление и температура на входе  $P_{вх} = 101325$  Па,  $T_{вх} = 293,2$  К; на выходе  $P_{вых} = 100304$  Па,  $T_{вых} = 293,2$  К, что соответствует условиям продувки на безмоторной установке по методике ММЗ [6, 7, 11]. Условия на стенках – адиабатные стенки с шероховатостью  $R_z = 50$  мкм.

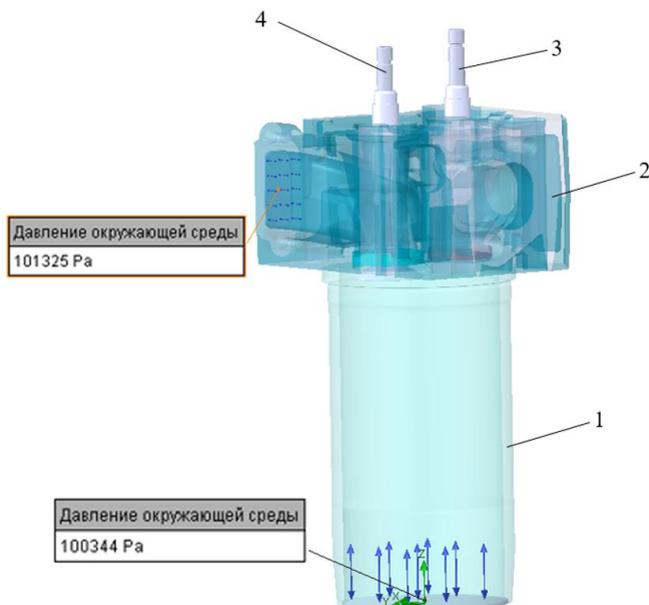


Рисунок 2 – Виртуальная установка для продувки впускных каналов  
 1 – гильза цилиндра; 2 – головка дизеля с исследуемыми каналами;  
 3 – выпускной клапан; 4 – впускной клапан

В результате моделирования определялся массовый расход воздуха  $M_{сек}$ , окружная скорость воздушного потока на выходе из цилиндра  $w_t$  относительно его оси, средний радиус цилиндрической системы координат  $r_{cp}$ , анализировалось распределение скорости и линии тока в канале, клапанной щели и цилиндре [7, 12].

Для обработки полученных данных использовались следующие зависимости:

– эффективное проходное сечения [7, 13]:

$$\mu f = \frac{M_{сек}}{M_m} \cdot f_{кл} = \frac{M_{сек}}{W_m \cdot \rho_k},$$

где  $M_m$  – теоретический расход воздуха;  $f_{кл}$  – проходная площадь клапанной щели;  $W_m$  – теоретическая скорость истечения;  $\rho_k$  – плотность воздуха на выходе из канала;

– усредненная угловая скорость воздушного заряда [7, 14]:

$$\omega = \frac{w_t}{r_{cp}};$$

– момент количества движения [2, 14]:

$$M_{кр} = \omega \cdot M_{сек} \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2,$$

где  $D$  – диаметр цилиндра ( $D = 110$  мм);

– коэффициент закрутки  $K$  [7]:

$$K = \frac{2 \cdot M_{кр} \cdot S \cdot \rho_k}{M_{сек}^2},$$

где  $S$  – ход поршня,  $S = 140$  мм;

– вихревое отношение, отношение угловой скорости вращения воздушного заряда в цилиндре в конце впуска к угловой скорости коленчатого вала двигателя:

$$\Omega = \frac{\pi}{2} \int \frac{2 \cdot M_{кр} \cdot S \cdot \rho_k}{M_{сек}^2} \cdot f(\alpha) \frac{ds}{S},$$

где  $\alpha$  – угол поворота коленчатого вала;  $f(\alpha)$  – функция скорости поршня, равная отношению мгновенной скорости поршня к скорости кривошипа;  $S$  – текущее положение поршня.

## Аэродинамические характеристики впускных каналов двигателя MMZ-262CNG и Д-262

Результаты виртуальной продувки представлены на рисунке 3.

Суммарное вихревое отношение  $\Omega$  составило:

– для двигателя MMZ-262CNG  $\Omega = 5,11$ ;

– для дизеля Д-262  $\Omega = 4,19$ .

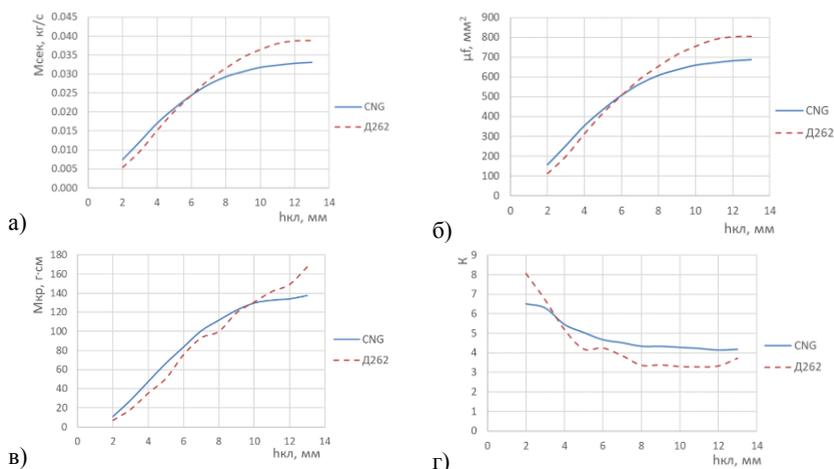


Рисунок 3 – Результаты виртуальной продувки впускных каналов двигателей Д-262 и MMZ-262CNG, зависимости

- а) массового расхода воздуха  $M_{сек}$ ; б) эффективного проходного сечения  $\mu_f$ ; в) расчетного момента на решетке  $M_{кр}$ ; г) коэффициента закрутки воздушного заряда  $K$  от высоты подъема клапана  $h_{кл}$

Из результатов продувки можно сделать следующие выводы:

– пропускная способность впускных каналов двигателя MMZ-262CNG при высотах подъема клапана  $h_{кл} = 8–13$  мм существенно ниже чем у дизеля Д-262, что отрицательно сказывается на наполнении цилиндров. При  $h_{кл} = 13$  мм потери в эффективном проходном сечении  $\mu_f$  составляют 17 %;

– способность генерировать воздушный вихрь каналов MMZ-262CNG выше чем у каналов Д-262. Суммарное вихревое отношение  $\Omega$  у каналов MMZ-262CNG составляет 5,11, что на 18 % превышает интенсивность вихря, создаваемого каналами головки дизеля Д-262. Для нормальной организации процесса смесеобразования для дизелей с системой впрыска непосредственного действия отношение  $\Omega$  должно находиться в пределах 3–4,5 [1 ,15].

Стоит иметь в виду, что виртуальная продувка проводилась для 3D-моделей. Характеристики реальных каналов, полученных в результате литья в земляные формы, могут существенно отличаться как от моделей, так и между собой в одной головке [7].

С целью верификации проведено сравнение результаты моделирования и натурной продувки впускных каналов головок цилиндров MMZ 262CNG и Д-260.4 (рисунок 4) на безмоторной установке.

Результаты натурного эксперимента можно оценить двояко.

С одной стороны, результаты натурной и виртуальной продувки сопоставимы как по расходу, так и по крутящему моменту на спрямляющей решетке. Сходимость результатов можно считать удовлетворительной.

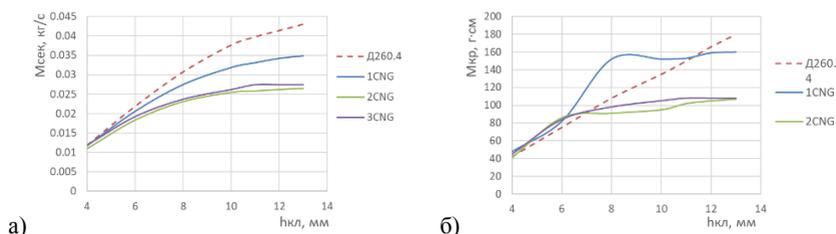


Рисунок 4 – Результаты натурной продувки впускных каналов двигателей Д-260.4 и MMZ-262CNG, зависимости а) массового расхода воздуха  $M_{сек}$ ; б) момента на решетке  $M_{кр}$  от высоты подъема клапана

С другой стороны, результаты продувки на безмоторной установке показывают существенные различия свойств каналов в одной отливке как по пропускной способности, так и по моменту на решетке. Разность по расходу воздуха при  $h_{кл} = 13$  мм достигает 24 %, по моменту на решетке 33 %.

Учитывая схожесть поведения кривых расхода воздуха и момента на решетке у 2 и 3 цилиндров можно сделать предположение, что негативное влияние на результаты статической продувки оказывает близкое расположение входных портов каналов и подвод воздуха общим патрубком. Для уточнения влияния данного явления на наполнение цилиндров необходимо провести дополнительные натурные исследования по определению расхода воздуха через входные порты одинарных и сдвоенных каналов.

### **Анализ структуры потока во впускном канале MMZ-262CNG**

В идеальном канале по мере продвижения воздушного потока от входного сечения к клапанной щели скорость должна равномерно увеличиваться. Зоны замедления потока и тем более вихреобразования нежелательны [3, 5, 12]. Рассмотрим структуру потока во впускном канале по горизонтальным сечениям.

Распределение скорости в верхнем сечении подводящего участка равномерное, в начале участка наблюдается некоторое увеличение скорости, по мере входа потока в спиральную камеру поток притормаживается (рисунок 5).

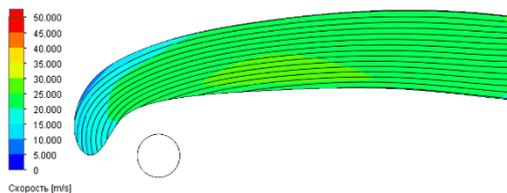


Рисунок 5 – Распределение скорости в подводящем участке

По мере продвижения потока в спиральную камеру на внешнем участке наблюдается зона торможения потока (рисунки 6 а, б, в), на внутренней части перехода от подводящего канала к спиральной камере наблюдается возникновение зоны паразитного завихрения (рисунки 6 б, в), которая в дальнейшем развивается (рисунок 7) и является причиной затенения части проходного сечения клапанной щели. В паразитном вихре потенциальная и кинетическая энергия потока

превращается в теплоту, идет процесс диссипации энергии, он является причиной уменьшения пропускной способности сечения и повышения гидравлического сопротивления.

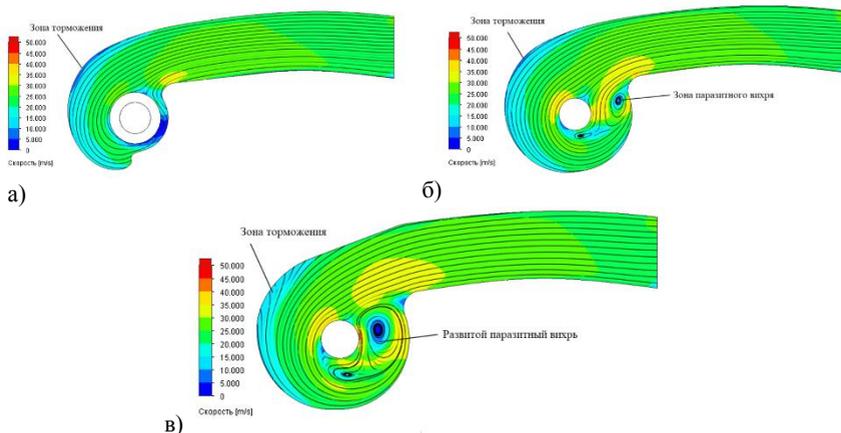


Рисунок 6 – Распределение скорости в подводящем участке камеры закрутки  
а) – в) различные сечения по высоте

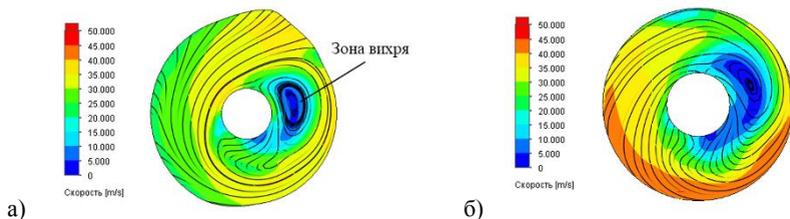


Рисунок 7 – Распределение скорости в камере закрутки  
а), б) различные сечения по высоте

По периметру клапанной щели наблюдается неравномерное распределение скорости потока, максимальная скорость достигается в месте противоположном зоне образования паразитного вихря (рисунок 8). Неравномерное распределение скорости по периметру клапанной щели свидетельствует о снижении пропускной способности канала и росте его гидравлического сопротивления.

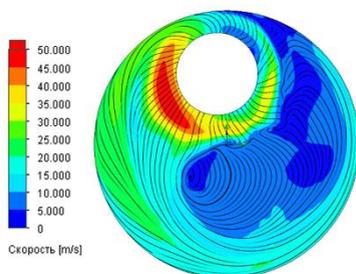


Рисунок 8 – Распределение скорости на выходе из клапанной щели в цилиндр

Были проведены подобные исследования для серийного индивидуального впускного канала головки дизеля Д-262, обнаруженные паразитные завихрения имеют меньший масштаб и интенсивность, и в силу большего поперечного сечения канала оказывают меньшее влияние на пропускную способность канала.

## Заключение

В результате моделирования определены характеристики впускных каналов газопоршневого двигателя MMZ-262CNG и дизельного двигателя Д-262. Впускные каналы двигателя MMZ-262CNG обладают более низкой пропускной способностью и повышенной способностью к генерации вихревого движения воздушного заряда в цилиндре дизеля.

При максимальной высоте подъема клапана эффективное проходное сечение  $\mu f$  впускного канала двигателя MMZ-262CNG составляет  $687 \text{ мм}^2$ , что на 17 % меньше чем у дизеля Д-262.

Суммарное вихревое отношение  $\Omega$  у впускного канала MMZ-262CNG составляет 5,11. Для организации нормального процесса смесеобразования для двигателей семейства Д-262 с топливной аппаратурой непосредственного действия  $\Omega$  должна находиться в пределах 3,5–4,5, для дизелей с аккумуляторной системой топливоподачи 3–4.

Проведен анализ структуры потока воздуха по сечениям впускного канала MMZ-262CNG. В результате анализа обнаружена область паразитного завихрения потока, являющаяся причиной снижения пропускной способности и повышения гидравлического сопротивления канала.

Прямое использование впускных каналов MMZ-262CNG в дизеле Д-262 может привести к ухудшению параметров рабочего процесса.

## Литература

1. Кухаренок, Г. М. Рабочий процесс высокооборотных дизелей. Методы и средства совершенствования / Г. М. Кухаренок – Минск : БГПА, 1999. – 180 с.
2. Кавтарадзе, Р. З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: учебник для вузов / Р. З. Кавтарадзе. – М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. – 589 с.
3. Вихерт, М. М. Конструирование впускных систем быстроходных дизелей / М. М. Вихерт, Ю. Г. Грудский. – М. Машиностроение, 1982. – 151 с.
4. Дьяченко, В. Г. Теория двигателей внутреннего сгорания. Учебник / В.Г. Дьяченко – Перевод с украинского языка. – Харьков : ХНАДУ, 2009. – 500 с.
5. Драганов, Б. Х. Конструирование впускных и выпускных каналов двигателей внутреннего сгорания / Б. Х. Драганов, М. Г. Круглов, В. С. Обухова. – Киев : Вища школа, Головное издательство, 1987. – 175 с.
6. Кухаренок, Г. М. Профилирование впускного канала малогабаритного дизеля / Г. М. Кухаренок, М. А. Клессо, А. В. Предко // Актуальные вопросы машиноведения : сборник научных трудов. Выпуск 9. – Минск : ГНУ ОИМ НАН Беларуси, 2020. – С. 79–83.
7. Кухаренок, Г. М. Оценка аэродинамических свойств впускных каналов дизеля / Г. М. Кухаренок, А. В. Предко // Наукові праці Міжнародної науково-практичної конференції присвяченої 90-річчю Харківського автомобільно-дорожнього університету та 90-річчю автомобільного факультету «Сучасні тенденції розвитку автомобільного транспорту та галузевого машинобудування», Харків, 16–18 вересня 2020 р. – Харьков : ХНАДУ, 2020. – С. 357–358.
8. ANSYS FLUENT 14/0 User's Guide/ ANSYS Inc., 2011.
9. Алямовский, А. А. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов, А. И. Харитонович, Н. Б. Понмарев. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.

10. Кухаренок, Г. М. Определение показателей впускных каналов с использованием виртуального стенда продувки / Г. М. Кухаренок, А. В. Предко, К. Н. Юрчук // Вместе к эффективному движению! Сборник научных статей Международной научно-практической конференции. – Минск : БНТУ, 2008. – С. 262–265.

11. Предко, А. В. Методы экспериментального исследования закручивающих впускных каналов / А. В. Предко // Состояние и перспективы развития науки и подготовки инженеров высокой квалификации в БГПА. Материалы международной 51-ой НТК БГПА. – Минск : БГПА, 1995. – С. 78–79.

12. Предко, А. В. Моделирование течения во впускном канале ДВС / А. В. Предко // Наука – образованию, производству, экономике Материалы Четвертой МНТК В 2 томах Том 1. – Минск : БНТУ, 2006 – С. 262–265.

13. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа. – М. : Наука, 1987. – 840 с.

14. Кухаренок, Г. М. Математическая модель вращения воздушного заряда в цилиндре дизеля / Г. М. Кухаренок, А. В. Предко // Вестник БНТУ. – 2002. – № 4. – С. 50–54.

15. Кухаренок, Г. М. Организация рабочего процесса шестицилиндрового тракторного дизеля / Г. М. Кухаренок, М. А. Клессо, А. В. Предко, Д. А. Телюк // 9-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса : сборник докладов Международной научно-технической конференции, Москва, 29 января 2021 г. – М. : МАДИ, 2021. – С. 233–244.

Статья поступила 03.11.2021

**УПРАВЛЕНИЕ И ДИАГНОСТИРОВАНИЕ  
ГИДРОФИЦИРОВАННЫХ ТРАНСМИССИЙ:  
СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ  
РАЗВИТИЯ**

*Рынкевич С. А.*, д-р техн. наук, доц.,  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: *rynkev@tut.by*

**CONTROL AND DIAGNOSIS OF HYDRAULIC  
TRANSMISSIONS: STATE OF THE PROBLEM AND  
PROSPECTS FOR DEVELOPMENT**

*S. Rynkevich*, Doctor of Engineering Science, Associate professor,  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus,  
e-mail: *rynkev@tut.by*,

*Рассмотрены наиболее важные вопросы комплексной проблемы управления и диагностирования гидрофицированных трансмиссий мобильных машин на современном этапе. Описаны условия эксплуатации и режимы работы автотранспортных средств с гидрофицированными трансмиссиями. Предложен обоснованный ряд информационных переменных и критериев качества оценки технического состояния современных трансмиссий. Даны перспективы развития автоматизированных трансмиссий.*

*Ключевые слова:* гидрофицированная трансмиссия, автотранспортное средство, управление, диагностика, техническое состояние, автоматизация, алгоритм, адаптивная интеллектуальная система.

*The most important issues of the complex problem of control and diagnostics of hydraulic transmissions of mobile machines at the present stage are considered. The operating conditions and operating modes of vehicles*

*with hydraulic transmissions are described. A reasonable number of informational variables and quality criteria for assessing the technical state of modern trans-missions are proposed. Prospects for the development of automated transmissions are given.*

*Key words: hydraulic transmission, vehicle, control, diagnostics, technical condition, automation, algorithm, adaptive intelligent system*

## **Введение**

Транспортные средства оснащены современными бортовыми электронными системами и комплексами. Казалось бы, проблема с автоматизацией управления и контроля полностью решается. Однако имеется ряд факторов, которые препятствует успешному продвижению на рынок и использованию для выполнения транспортных работ современных автомобилей, оснащенных всевозможными средствами микроэлектроники. Это, прежде всего, сложность условий движения автотранспортных средств, а также субъективизм самого слабого звена в системе водитель – автотранспортное средство – дорога, которым является человек-водитель. Таким образом, сложилось противоречие между высокоразвитыми электронными средствами, которыми оснащаются транспортные средства (ТС), и возникающим рядом проблем и задач по безопасному и эффективному управлению ТС. В связи с этим бортовые системы управления и диагностики транспорта нуждаются в разработке и внедрению на ТС новейших адаптивных алгоритмах управления, наделенных новыми интеллектуальными качествами.

Безрельсовые подвижные объекты – будем условно называть мобильными машинами. К мобильным машинам относятся автотранспортные средства (грузовые автомобили, легковые автомобили и автобусы), строительно-дорожные машины (погрузчики, автогрейдеры, бульдозеры), трактора (колесные и гусеничные) и машины специального назначения (технологический транспорт и другие машины). Преимущественно все перечисленные категории машин снабжены гидравлическим приводом управления механизмами.

Данная статья посвящена проблемам автоматизации мобильной машины с гидрофицированной трансмиссией.

Мобильная машина (ММ), оснащенная гидрофицированной трансмиссией (ГТ), представляет сложную, иерархически организованную

систему взаимодействующих механизмов и деталей, которые информационно связаны и целенаправленно функционируют.

По своему функциональному назначению ММ как система представлена следующими подсистемами, отражающими ряд аспектов: топливно-экономический, экологический, энергетический, устойчивости и управляемости, безопасности и надежности, виброзащиты, улучшения условий труда и комфортабельности водителя и пассажиров, управления движением.

Трансмиссии современных ММ, основными элементами которых являются механические и гидромеханические передачи, работают в сложных условиях. При этом звенья и элементы этих механизмов, представляющих собой вальные и планетарные коробки передач мобильных машин, постоянно подвергаются знакопеременным нагрузкам.

Для эффективного выполнения мобильными машинами транспортной работы и обеспечения их работоспособности необходимо непрерывно в режиме реального времени отслеживать техническое состояние этих сложных передач.

В процессе выполнения научно-исследовательских работ в рамках ГПНИ «Механика, металлургия диагностика в машиностроении» по заданию 1.19, которые выполнялись в 2016–2020 гг., были разработаны методы и алгоритмы контроля и диагностики передач со сложным движением звеньев для машин мобильного применения, оснащенных бортовыми системами [1–3].

Рассмотрим условия эксплуатации и режимы работы ММ. Они, эти условия и режимы, сильно разнообразны и определяются множеством факторов, к которым относятся условия эксплуатации, типовые режимы, характеристики маршрутов, фазы движения. Условия эксплуатации определяются дорожными, природно-климатическими и эксплуатационно-техническими факторами. Эксплуатация ММ происходит в различных типовых режимах, которые включают в себя фазы движения машины: разгон, установившееся равномерное движение, замедление, торможение, остановки. Все разнообразие условий эксплуатации не поддается точному математическому описанию, относится к случайным событиям и на практике воплощается в реальные маршруты движения [1]. Маршруты классифицируются по различным признакам. В зависимости от рельефа местности

маршруты бывают равнинные, горно-холмистые, горные и высокогорные. В зависимости от условий применения транспортного средства маршруты бывают магистральные, городские, карьерные и др. Если иметь в виду дороги с усовершенствованным покрытием, то можно выделить три характерных типа маршрутов по сложности условий их эксплуатации: магистральные, горные и городские. Различают комбинированные маршруты, например, магистрально-холмистые, горно-холмистые, а также пригородные, межрайонные, местные и т. д., которые относятся к частным случаям типовых маршрутов.

Рассмотренные обстоятельства оказывают непосредственное влияние на формирование тягово-скоростных и топливно-экономических показателей эксплуатируемой ММ, а также обеспечение ее безопасности и надежности. В связи с этим необходимо осуществлять дифференцированный их учет при синтезе алгоритмов управления в процессе комплексных исследований их влияния на показатели эффективности и качества, научно-технического прогнозирования на стадии проектировании перспективных систем управления и диагностики. Ориентация на уже достигнутый уровень обеспечения высоких технико-экономических показателей машин, решения вопросов обеспечения надежности и безопасности, управляемости и устойчивости, виброзащиты и комфортабельности и т. д. является не всегда оправданной ввиду неточности учета фактических режимов движения, неучета и недоучета всего многообразия факторов и условий работы ММ [4–6].

## **1. Автоматизация трансмиссий мобильных машин**

В конструкциях современных ММ часто используются гидрофицированные механизмы в совокупности с гидромеханическими передачами (ГМП) и механическими трансмиссиями (МТ) [6, 7].

Основная проблема автоматизации управления и диагностирования гидрофицированных трансмиссий современных ММ связана с многообразием и огромной сложностью происходящих при движении ММ процессов. Для решения этой проблемы широко используются новые технологии и методы, основанные на других подходах, отличных от тех, которые опираются на принципы классической теории

автоматического управления [8]. Использование современных технологий позволяет выйти на новый уровень проектирования автоматических устройств – уровень создания интеллектуальных бортовых систем (ИБС). Создание ИБС решает ряд задач данной проблемы. При этом появляется возможность использования систем управления/диагностики на основе большого объема информации различной физической природы. Конструкция автоматических систем управления и контроля упрощается, и снижается стоимость создаваемых изделий. Появляются возможности реализации программ управления/диагностики в режиме реального времени, а шины, оснащенные такими системами, становятся безопасными и надежными. Такие ММ уже наделяются интеллектуальными функциями, приобретая способность к обучению (самообучению) [9].

В соответствии с поставленными задачами НИР по заданию 1.19 были разработаны:

- методики мониторинга механических и гидромеханических передач со сложным движением звеньев для мобильных машин, оснащенных бортовыми системами управления;

- современные методы активного мониторинга трансмиссий мобильных машин в режиме реального времени;

- компьютерные модели для системы мониторинга трансмиссий мобильных машин и алгоритмы, реализующие методы контроля механических и гидромеханических передач со сложным движением звеньев;

- методика прогнозирования основных показателей, определяющих ресурс трансмиссий машин мобильного применения;

- технико-экономическая оценка эффективности разработанных методов активного мониторинга и контроля трансмиссий мобильных машин;

- рекомендации по рациональным областям применения этих методов.

Результаты данной НИР воплощены в создание гаммы технических устройств с алгоритмами мониторинга и контроля технического состояния мобильных и технологических машин. Разработаны практические рекомендации и техническая документация для их промышленного применения с последующим внедрением на отечественных предприятиях автомобилестроения.

Применение ГТ в конструкциях ММ увеличивает срок службы двигателя и трансмиссии, а также повышает проходимость и комфортабельность за счет более плавного изменения момента на ведущих колесах, трогания с места и разгона.

В современном автомобилестроении разрабатываемые АМБС и такая их разновидность, как системы технического диагностирования (СТД), должны обеспечивать следующие основные функции [1]:

- оперативное определение технического состояния основных механизмов ММ в текущий момент времени;
- комплексное диагностирование параметров элементов и механизмов трансмиссии, тормозной системы, подвески, гидропривода;
- непрерывный контроль (мониторинг) основных параметров механизмов и их элементов (температуры, давления масла в магистралях и фрикционных, расхода рабочей жидкости и др.);
- идентификация и предотвращение опасных ситуаций в процессе управления движением автомобиля при функционировании всех подсистем;
- защита от ошибочных управляющих действий водителя;
- анализ информации о текущих процессах с выдачей водителю оперативных сигналов отклонений от технических требований;
- прием информации от других измерительных систем по любому из стандартных интерфейсов и протоколов;
- выдача результатов диагностирования в текстовом и графическом виде;
- отображение текущего состояния машины (ЛА в частности) в графическом режиме на дисплее в удобном для водителя виде.

Международным стандартом SAE J1939-73 специально для автомобильной диагностики разработан комплекс требований для построения диагностических электронных систем. Там же приведены базовая нотация и синтаксис используемых языков, позволяющих создавать программные коды для программирования микроконтроллеров [1].

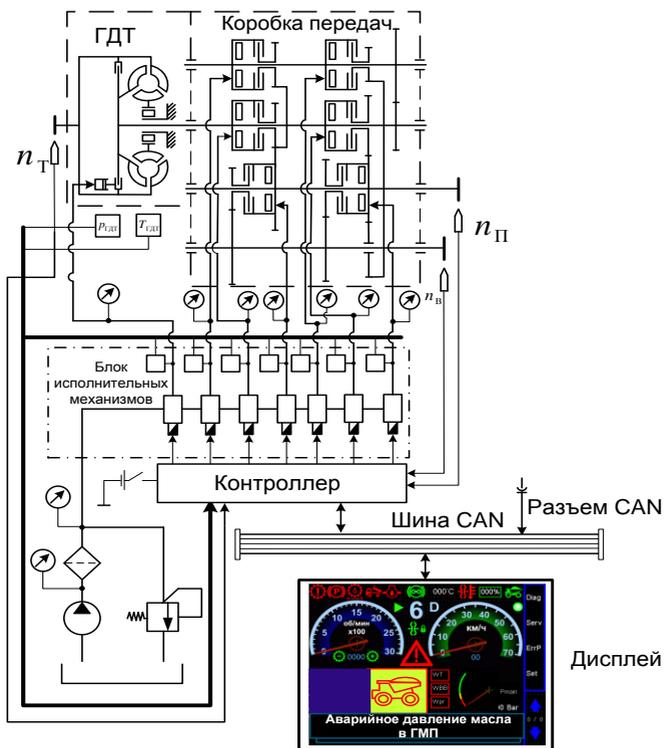


Рисунок 1 – Схема интеллектуальной бортовой системы управления и диагностирования ГМП автосамосвала

К настоящему времени разработанные для автосамосвалов БелАЗ-7555 ИБС ГМП прошли эксплуатационные испытания, и осуществлена подготовка к их серийному производству. Предложенная автором перспективная ИБС и алгоритмы ее функционирования используются при оперативном определении ТС трансмиссии автомобилей-самосвалов. Система обрабатывает сигналы о неисправностях компонентов ГМП, парирует ошибочные действия водителя, исключает одновременное включение двух передач, выдает информацию на дисплей аварийных режимах работы и нестандартных ситуациях, обеспечивает хранение этой информации с возможностью вывода ее на ноутбук для анализа и принятия решения (рисунок 1).

## **2. К вопросу формирования технических диагнозов в автоматических ГТ ММ**

Автоматизация управления трансмиссиями ММ неразрывно связана с автоматизацией диагностирования технического состояния мобильных машин с ГТ. Источником формирования технических диагнозов, характеризующих состояние ГТ, служит комплекс информации об изменении характеристик диагностических параметров. Количество информации, поставляемой автоматической системе диагностирования (АСД), должно быть необходимым и достаточным для достоверной однозначной идентификации режимов работы ГМП и формирования адекватных происходящим процессам диагнозов, обеспечивающих безопасность и надежность [8–10].

Эффективное функционирование механизмов автомобилей, тракторов и других мобильных машин может быть обеспечено путем применения самых совершенных принципов, методов и технических средств определения их технического состояния (ТС). Диагностические системы являются неотъемлемой принадлежностью современных автомобилей и их механизмов, позволяя автоматизировать процессы получения объективной оценки их ТС в рамках стратегии, нацеленной на достижение высоких показателей технического уровня и конкурентоспособности транспортных объектов. В связи с этим приобретает существенную значимость развитие теории диагностирования автомобильных систем [1].

Исходя из анализа условий работы автомобилей установлено, что для обеспечения качественного диагностирования их механизмов необходимо использовать определенный комплекс информационных переменных (ИП), которые зачастую одновременно служат и диагностическими параметрами (ДП). Поскольку одновременно осуществляется и управление машиной, и ее диагностирование, то некоторые информационные переменные служат также диагностическими параметрами и используются и в том, и в другом случае.

При обоснованном отборе ИП в качестве диагностических параметров следует учитывать: уровень разрабатываемых математических моделей, отражающих функциональные зависимости между конструктивными параметрами ММ и ИП; точность и степень совершенства существующих технических средств измерения ИП, а также

возможность разработки и применения новых средств, удовлетворяющих требованиям к классу точности, условиям эксплуатации, стоимости и т. д.; уровень приспособленности объекта к автоматизации процесса диагностирования; возможность взаимодействия разрабатываемой автоматической системы диагностирования с остальными бортовыми электронно-вычислительными комплексами, а также уровень использования новых информационных технологий.

Для анализа функционирования (движения) ММ автором получена система дифференциальных уравнений, описывающая движение дискретных масс динамической модели ММ [1]. В векторно-матричном виде она имеет вид:

$$\vec{\omega} = \frac{1}{J} \cdot \vec{F} [\vec{M}_B, \vec{M}_{ГДТ}, \vec{M}_y, \vec{M}_d, \vec{M}_\phi, \vec{L}_\phi, \vec{L}_H, \vec{u}, \vec{\eta}];$$

$$\vec{M}_y = \vec{F}(\vec{c}, \vec{\omega}, \vec{u}); \quad \vec{M}_d = (\vec{\mu}, \vec{\omega}, \vec{u}),$$

где  $\vec{\alpha}$  и  $\vec{J}$  – векторы угловых скоростей и приведенных моментов инерции сосредоточенных масс;  $\vec{M}_B$  – вектор момента внешних воздействий (двигателя, сопротивления качению колес, подъему и воздуха);  $\vec{M}_{ГДТ}$  – вектор момента преобразующих свойств ГДТ;  $\vec{M}_y$  и  $\vec{M}_d$  – векторы моментов упругих и диссипативных элементов;  $\vec{M}_\phi$  – вектор момента трения фрикционных элементов, т. е. фрикционных муфт (ФМ) блокировки гидротрансформатора (ГДТ), коробки передач и между сосредоточенными массами ступиц и шин ведущих колес;  $\vec{L}_\phi$  – вектор дискретных функций состояний ФМ;  $\vec{L}_H$  – вектор дискретных функций состояния ГДТ,  $\vec{u}$  и  $\vec{\eta}$  – векторы передаточных чисел пар шестерен, обеспечивающих передачу энергии между входным и промежуточным валами, понижающего и повышающего диапазонов, главной и колесной передач и соответствующих КПД;  $\vec{c}$  и  $\vec{\mu}$  – векторы параметров упругих и диссипативных элементов (коэффициентов жесткости и сопротивления). Дискретные функции  $L_{\alpha 1}, L_{\phi 1} \dots L_{\phi 4}, L_{\phi k}$ , равны 1 в процессе включения ФМ в их замкнутом

состоянии и равны 0 при выключении и в выключенном состоянии ФМ, а  $L_H = 1$  при функционировании ГДТ, после его блокирования.

Для того, чтобы в полной мере отражать информацию о техническом состоянии ГТ ММ, при выполнении комплекса НИР была установлена необходимая и достаточная совокупность ИП, которые могут служить в качестве ДП для АСД [4, 5].

Это:

– *механические ДП*, т. е. частоты вращения валов двигателя, турбинного ГДТ и выходного КП  $n_o, n_T, n_g$ , об/мин;

– *гидравлические ДП*, к которым относятся:

– *тепловые ДП* – это температура рабочей жидкости в магистралях и на выходе (входе) ГДТ  $T_{ГДТ}$ , К;

– *электрические и временные ДП*:

время регулирования давления во фрикционе при переключении передач  $t_p$ , с;

– эталонное время буксования фрикционов коробки передач  $t_э$ , с;

– предельное время буксования фрикционов коробки передач  $t_{б.п}$ , с;

– сигнал индикатора неисправности датчика скорости  $D_v$ ;

– номинальный ток управления пропорциональными электромагнитами фрикционов ГМП  $I_{ном}$ , А;

– напряжение на обмотке электромагнитных клапанов  $U_{эк}$ , В;

– сила тока на обмотке электромагнитных клапанов  $I_{эк}$ , А;

– количество переключений передач  $k_{КП}$  и блокировок ГДТ

$k_{ГДТ}$  ;

– сигнал индикатора уровня масла в баке  $S_o$  ;

– время задержки формирования нового сигнала управления  $t_{зв}$ , с.

Для прогнозирования перехода ММ в неработоспособное ТС в качестве меры удаления значения ДП от границы области работоспособности определен запас работоспособности  $\Delta \xi_i$ . Увеличение  $\Delta \xi_i$  соответствует удалению значения ДП от этой границы, и наоборот. Выход ДП за границы области выявляет появление отказа.  $\Delta \xi_i$  через текущее  $\Delta \xi_i$  и граничное  $\Delta \xi_i^f$  значения вычисляется по формуле:

$$\Delta \xi_i = \left| \xi_i - \xi_i^f \right|.$$

На основе комплекса теоретических и экспериментальных исследований и анализа ТС ГМП должен быть получен перечень допустимых и предельных значений параметров [8, 9, 12].

## Выводы

При решении задач автоматизации трансмиссий мобильных машин различного назначения следует создавать *адаптивные алгоритмы управления и диагностирования* для бортовых электронных систем, которые учитывают *в режиме реального времени* большой объем информации различной физической природы; причем эти алгоритмы должны быть наделены *интеллектуальными качествами* и способны непрерывно обеспечивать функции управления, контроля и мониторинга трансмиссий и других механизмов мобильных машин.

## Литература

1. Скойбеда, А. Т. Гидромеханические передачи мобильных машин. Проектирование и диагностика / А. Т. Скойбеда, С. А. Рынкевич. – Могилев : УПКП «Могилев. обл. укруп. типогр. им. С. Соболя», 2014. – 230 с. : ил.
2. Рынкевич, С. А. Управление и диагностика мобильных машин на основе бортовой микроэлектроники: этапы и перспективы / С. А. Рынкевич // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2015. – № 3 (44). – С. 57–67.
3. Рынкевич, С. А. Автоматизация трансмиссий гидрофицированных мобильных машин / С.А. Рынкевич // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2015. – № 4 (45). – С. 68–78.
4. Рынкевич, С.А. Проектирование, эксплуатация и диагностика мобильных машин / С.А. Рынкевич, В.В. Кутузов. – Могилев : Белорус.-Росс. ун-т, 2016. – 223 с. : ил.
5. Рынкевич, С. А. Автоматизация проектирования гидрофицированных строительного-дорожных машин / Кафедра СДПТМиО». История становления и развития». – 21 ноября 2014 г. – С. 101–114.

6. Рынкевич, С.А. Комплексная идентификация технического состояния ГМП / С. А. Рынкевич // Автомобильная промышленность. – 2012. – № 9. – С. 27–31.

7. Рынкевич, С. А. Основы управления и диагностирования автотранспортных средств с применением бортовой микроэлектроники / С. А. Рынкевич // Вестник Курганского государственного университета. Серия «Технические науки». Выпуск 12. – 2017. – № 2 (45). – С. 77–84.

8. Рынкевич, С. А. Оценка технического состояния гидромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала в условиях эксплуатации / С. А. Рынкевич // Материалы I Междун.-практ. конф. «Актуальные проблемы научного знания. Новые технологии ТЭК-2017». – Тюмень : ТИУ. – 2017. – С. 198–202.

9. Рынкевич, С. А. Концептуальные основы диагностики гидрофицированных трансмиссий карьерной техники / С. А. Рынкевич // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства. Материалы международной научно-технической конференции. Сборник трудов. – Тюмень, 2018. – С. 237–241.

10. Рынкевич, С. А. Методология проектирования подвижных объектов / С. А. Рынкевич // Сб. науч. трудов БНТУ «Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии» : Минск, 2018. – С. 130–153.

11. Семёнов, И. Н. Повышение надежности гидрофицированных трансмиссий легковых автомобилей / И. Н. Семёнов И.Н., С. А. Рынкевич // Автомобиле- и тракторостроение : материалы Международной научно-практической конференции, Минск, 24–27 мая 2019 г. / Белорусский национальный технический университет ; редкол. : отв. ред. Д. В. Капский [и др.]. – Минск : БНТУ, 2019. – Т. 1. – С. 48–52.

12. Рынкевич, С. А. Автоматизация диагностирования механических и гидромеханических трансмиссий / С. А. Рынкевич // Автотракторостроение и автомобильный транспорт : сборник научных трудов в 2-х томах / Белорусский национальный технический университет; редкол. : отв. ред. Д. В. Капский [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – Т. 1. – С. 46–50.

Статья поступила 08.11.2021

## ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОПАСНОСТИ И КАЧЕСТВА АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

**Бажинов А. В.**<sup>1</sup>, докт. техн. наук, проф.,

**Кравцов М. Н.**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.,

**Бажинова Т. А.**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.,

<sup>1</sup>Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,  
г. Харьков, Украина, e-mail: *super-mikvich@ukr.net*,

<sup>2</sup>Харьковский национальный технический университет сельского  
хозяйства им. П. Василенко, г. Харьков, Украина

## SAFETY AND QUALITY INDICATORS OF ROAD TRANSPORT

**A. Bazhinov**<sup>1</sup>, Doctor of Engineering Science, Professor,

**M. Kravtsov**<sup>1</sup>, Ph.D. in Engineering, Associate professor

**T. Bazhinova**<sup>2</sup>, Ph.D. in Engineering, Associate professor

<sup>1</sup>Kharkiv National Automobile and Highway University,  
Kharkov, Ukraine, e-mail: *super-mikvich@ukr.net*,

<sup>2</sup>Kharkovsky National Technical University named after P. Vasilenko,  
Kharkov, Ukraine

*Отсутствие качественных и экологически безопасных легковых автомобилей, произведенных в Украине, является одной из основных причин низкой конкурентоспособности автотранспортных средств. Качество легковых автомобилей определяется рядом показателей, характеризующих весовые и габаритные параметры, топливную экономичность, производительность, маневренность, проходимость, надежность, безопасность, стоимость и прочее. Таким образом, проблема оценки и выбора пользователем легкового автомобиля на этапе эксплуатации решена не полностью, что определяет актуальность данной темы.*

*Целью работы является повышение эффективности оценки показателей качества автомобилей за счет количественной их оценки на этапе эксплуатации.*

*Решение поставленной задачи было исполнено с использованием системного подхода и рационального сочетания теоретических и экспериментальных исследований, обобщения и анализа известных научных результатов, а также использование математического моделирования, математической статистики, впервые разработанных специальных методик.*

*Практическое значение полученных результатов заключается в том, что полученные научные результаты составляют единый комплекс исследований (концепция, принципы, критерии, методы и математические модели), предложенная система методических аспектов использования разработанных методов оценки показателей качества автомобилей на этапе эксплуатации. Система включает математические модели оценки показателей качества легковых автомобилей на этапе эксплуатации и позволяет выполнить интегральную и дифференциальную оценку показателей качества автомобилей, которая учитывает уровень научно-технических решений на этапе эксплуатации, а также обоснован выбор рационального варианта подвижного состава пользователем. Методологические основы расчета целесообразно реализовать в приложениях смартфонов и планшетов. Программа, согласно техническим характеристикам легкового автомобиля и условий эксплуатации, рассчитывает оценку показателей его качества на этапе эксплуатации.*

*Научная новизна заключается в методе определения показателей качества автомобилей на этапе эксплуатации, которые в отличие от известных, оценивают легковые автомобили по энергетическим параметрам.*

*Ключевые слова: автомобиль, электромобиль, гибридный автомобиль, экологический, безопасный, качество.*

*The lack of quality cars produced in Ukraine is one of the main reasons for the low competitiveness of motor vehicles. The quality of passenger cars is determined by a number of indicators characterizing the weight and overall parameters, fuel economy, performance, maneuverability, throughput, reliability, safety, cost, and more. Thus, the problem of assessment and selection by the user of a passenger car during the operation phase has not been completely resolved, which determines the relevance of this topic. The aim of the work is to increase the efficiency of assessing the quality indicators of cars by quantifying them at the operation stage. The solution of the task was*

*performed using a systematic approach and a rational combination of theoretical and experimental research, generalization and analysis of known scientific results, as well as the use of mathematical modeling, mathematical statistics, and the first developed special techniques. The practical significance of the obtained results lies in the fact that the obtained scientific results constitute a single complex of research (concept, principles, criteria, methods and mathematical models), the proposed system of methodological aspects of using the developed methods for assessing the quality indicators of cars during the operation phase. The system includes mathematical models for assessing the quality indicators of passenger cars at the operational stage and allows you to perform an integral and differential assessment of automobile quality indicators, which takes into account the level of scientific and technical solutions at the operational stage, and justifies the choice of a rational rolling stock option by the user. The methodological basis of the calculation should be implemented in applications of smartphones and tablets. The program, according to the technical characteristics of the car and operating conditions, calculates an assessment of its quality indicators at the operation stage. The scientific novelty lies in the method of determining the quality indicators of cars at the operation stage, which, unlike the known ones, evaluate cars by energy parameters.*

*Keywords: vehicle, electricvehicle, hybridvehicle, method, quality.*

## **Введение**

На сегодняшний день выбор легкового автомобиля усложнено тем, что проводится в условиях дефицита информации закрытостью эксплуатационных отказов сервисными предприятиями; ограниченностью и, в значительной степени, рекламным характером предоставляемой заводами-изготовителями; отсутствием централизованного банка, содержащий объективную информацию по фактическим показателям технико-эксплуатационных свойств автомобилей; сложностью сопоставления информации, получаемой из различных источников и др. При этом следует учитывать, что легковые автомобили определенного назначения, имеют различные свойства в зависимости от внешних условий, в которых они используются.

Наличие специфических свойств легковых автомобилей позволяет использовать их в условиях, при которых применение иной модели автомобиля менее целесообразным. Определение технико-эксплуатационных свойств и качества автомобилей в целом позволяет выбирать тот, который наилучшим образом соответствует требованиям пользователя для данных условий эксплуатации, дает возможность разрабатывать оптимальные методы поддержки в эксплуатации свойств, заложенных при проектировании и производстве автомобилей. Это обстоятельство особенно важно при выборе или приобретенные легкового автомобиля для эксплуатации в условиях Украины.

Из анализа литературных источников установлено, что современное состояние рынка и обновления структуры легковых автомобилей на этапе эксплуатации обуславливают необходимость комплексного подхода к оценке показателей качества с целью лучшей альтернативы [1–4]. Степень соответствия легковых автомобилей условиям эксплуатации и ожиданиям потребителя необходимо учитывать большой перечень технико-эксплуатационных свойств, отображаемых по совокупности и качественность параметров. Выполнен обзор существующих исследований по анализу методов оценки качества автомобилей, которые не позволяют в полной мере комплексно и объективно учитывать всю совокупность показателей, обуславливающих необходимость их совершенствования.

## **Результаты исследования индекса качества**

Для оценки индекса качества автомобилей разработаны эксплуатационные показатели. Важными критериями оценки показателей качества автомобилей на этапе эксплуатации является функциональная стабильность, экология, комфорт, технические решения, безопасность движения. Качество автомобиля с учетом его уровня функциональной стабильности и энергоемкости на этапе эксплуатации оценивается с позиции периодичности выполнения технических воздействий, энергозатрат и стоимости работ по техническому обслуживанию и ремонту. Критерий, который оценивает функциональную стабильность показателей качества составляет для:

– базового автомобиля

$$K_H = \frac{0,079 \cdot N_{max} \cdot g_{emin} \cdot C_T \cdot L_{ГАР}}{C_{авт} \cdot \rho_T \cdot V_a} = \frac{A}{V_a}, \quad (1)$$

$$A = \frac{0,079 \cdot N_{max} \cdot g_{emin} \cdot C_T \cdot L_{ГАР}}{C_{авт} \cdot \rho_T}; \quad (2)$$

– гибридного автомобиля

$$K_H = \frac{20 \cdot N_{max} \cdot g_{emin} \cdot C_T \cdot L_{ГАР}}{C_{авт} \cdot \rho_T \cdot V_{max} \cdot V_a} = \frac{C}{V_a}, \quad (3)$$

$$C = \frac{20 \cdot N_{max} \cdot g_{emin} \cdot C_T \cdot L_{ГАР}}{C_{авт} \cdot \rho_T \cdot V_{max}}; \quad (4)$$

– электромобиля

$$K_H^e = \frac{2,7 \cdot E_{АКБ} \cdot C_e \cdot L_{ГАР} \cdot V_{max}}{C_{авт} \cdot L_3 \cdot V_a} = \frac{B}{V_a}, \quad (5)$$

$$B = \frac{2,7 \cdot E_{АКБ} \cdot C_e \cdot L_{ГАР} \cdot V_{max}}{C_{авт} \cdot L_3}, \quad (6)$$

где  $N_{max}$  – максимальная мощность двигателя, кВт;  $g_{emin}$  – минимальное значение удельного расхода топлива, г/кВт·ч;  $C_T$  – стоимость одного литра топлива, грн.;  $L_{ГАР}$  – гарантийный пробег автомобиля, км;  $C_{авт}$  – стоимость нового автомобиля, грн.;  $\rho_T$  – удельный вес топлива, кг/л;  $V_a$  – скорость, км/ч;  $E_{АКБ}$  – емкость батареи, кВт·ч;  $C_e$  – стоимость одного кВт·ч, грн.;  $L_3$  – запас хода на электротяге, км;  $V_{max}$  – максимальная скорость, км/ч.

Из приведенных уравнений следует, что для конкретного автомобиля критерий функциональной стабильности оценки показателей качества не будет величиной постоянной.

В период динамичного роста высоко конкурентного автомобильного рынка постоянно повышается уровень комфорта как водителя, так

и пассажиров. Это достигается за счет улучшения конструкции автомобиля, то есть размеров салона, багажника, пути колес и колесной базы, а также уровня шума и температуры в салоне. Итак, критерий показателей качества комфорта можно определить из уравнения

$$K_{\Phi} = \frac{L_{\text{б}} \cdot K_{\text{к}} \cdot Y_{\text{ш}}}{128 \cdot L_{\text{к}}}, \quad (7)$$

где  $L_{\text{б}}$ ,  $L_{\text{к}}$  – соответственно база и колея колес автомобиля, м;  $K_{\text{к}}$  – коэффициент что учитывает наличие кондиционера  $K_{\text{к}} = 0,9$ , а климат-контроля  $K_{\text{к}} = 0,8$ ;  $Y_{\text{ш}}$  – уровень шума в салоне при движении автомобиля,  $Y_{\text{ш}} = z + \zeta \cdot V_{\text{а}}$  для автомобилей с ДВС  $z = 40$  дБ, а для электромобилей и гибридных  $z = 30$  дБ, коэффициент постоянный  $\zeta = 0,2$  дБ·год/км.

На рисунке 1 показано изменение критериев показателей оценки качества функциональной стабильности и комфорта базового автомобиля, гибридного и электромобиля в зависимости от средней скорости движения.

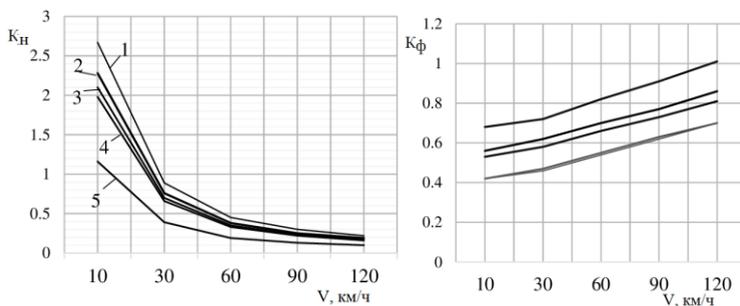


Рисунок 1 – Изменение критериев функциональной стабильности ( $K_{\text{н}}$ ) и комфорта базовых автомобилей ( $K_{\text{ф}}$ ), гибридного и электромобиля в зависимости от скорости движения

1 – Lanos Sens; 2 – Mitsubishi Lancer; 3 – Chevrolet Aveo;

4 – Toyota Prius; 5 – Nissan Leaf

Экологическую безопасность автомобилей можно оценить путем комплексного анализа ряда технико-экономических проблем, включая закономерности образования токсичных и канцерогенных веществ, техногенное загрязнение атмосферы, исследования

топливно-экологических показателей двигателей и другие. Критерий суммарной токсичности является многомерным вектором, который трудно выразить одним числом. Итак, оценить качество экологической безопасности автомобиля можно существенно упростить, если за базовую норму стандарта (Евро 6) принять оксид азота ( $NO_x$ ) равной 0,06 г / км для бензиновых и 0.08 г / км для дизельных двигателей, а расход топлива принять за минимальной. Расчетные выражения качества экологической безопасности можно записать как для автомобилей с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) (7), так и для гибридных автомобилей (8):

$$K_e = \frac{0,0033 \cdot H_{л.min} \cdot V_{max}}{K_{NO_x} \cdot V_a}, \quad (8)$$

где  $K_{NO_x}$  – допустимая норма оксида азота по стандарту (Евро-6), г/км;  $H_{л.min}$  – минимальный расход топлива автомобилем, л/100 км.

$$K_e^{\Gamma} = \frac{0,0275 \cdot H_{л.min} \cdot N_e \cdot V_a}{K_{NO_x} \cdot V_{max} \cdot N_{max}}, \quad (9)$$

где  $N_e$  – мощность электродвигателя, кВт;  $N_{max}$  – мощность ДВС, кВт.

Безопасность автомобиля характеризуется тормозными качествами, габаритами и наличием дополнительных опций, обеспечивающих безопасные условия работы водителя. Обобщающим показателем активной безопасности принято тормозной коэффициент, а пассивной безопасности принято количество звезд, полученных в рейтинге безопасности EuroNCAP Европейской программы проверки пассивной безопасности серийных легковых автомобилей. Таким образом, критерий оценки показателей качества безопасности движения определены по следующим уравнением

$$K_{\sigma} = \frac{1,8 \cdot S_{\Gamma}}{n_3 \cdot S_{\Gamma min}}, \quad (10)$$

где  $n_3$  – количество звезд, полученных в оценочном рейтинге краш-тестов;  $S_T$  – тормозной путь при скорости 100 км/ч, м;  $S_{Tmin}$  – наименьший тормозной путь среди всех испытуемых автомобилей, м.

Критерий качества технических решений определяется на основании анализа значений показателей аналогов, которые отражают лучшие мировые тенденции их развития. До значений показателей оценки качества технических решений автомобиля относятся расход топлива, масса автомобиля, время разгона до 100 км/ч, максимальная скорость.

Изменение критерия оценки показателей качества технических решений и критерия безопасности движения автомобилей и приведены на рисунке 2.

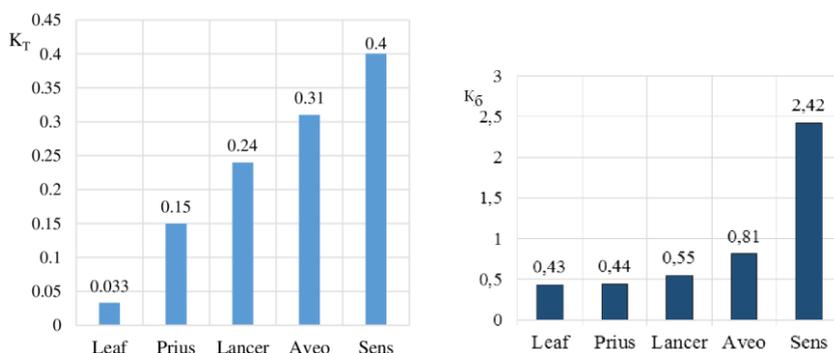


Рисунок 2 – Изменение критерия безопасности движения автомобилей и критерия качества технических решений по маркам автомобилей

Критерий оценки показателей качества технических решений для базовых автомобилей и гибридных определяется так

$$K_T = \frac{0,036 \cdot H_{min} \cdot t_p \cdot \rho_T \cdot V_{max}}{G_a}, \quad (11)$$

для электромобилей

$$K_T^e = \frac{0,324 \cdot E_{AKB} \cdot t_p \cdot \rho_T \cdot V_{max}}{L_3 \cdot G_a}, \quad (12)$$

где  $G_a$  – масса автомобиля, кг;  $t_p$  – время разгона от 0 до 100 км/ч.

Проблему превращения многокритериальной задачи оценки качества в однокритериальной можно решить способом формирования интегрального показателя [5, 6].

Из уравнения следует, что чем меньше интегральный критерий, тем выше качество легкового автомобиля. И так математическая модель интегрального критерия оценки качества автомобилей с учетом средней скорости движения составит:

– для базовых автомобилей

$$K_I = F + Z \cdot (40 + 0,2 \cdot V_a) + (A + D) / V_a, \quad (13)$$

где

$$F = \left[ \left( \frac{1,8 \cdot S_T}{S_{Tmin} \cdot n_3} \right) + \frac{0,036 \cdot H_{л min} \cdot t_p \cdot \rho_T \cdot V_{max}}{G_a} \right]; \quad (14)$$

$$Z = \frac{L_6 \cdot K_K}{128 \cdot L_K}; \quad (15)$$

$$A = \frac{0,079 \cdot N_{max} \cdot g_{emin} \cdot C_T \cdot L_{ГAP}}{C_{авт} \cdot \rho_T}; \quad (16)$$

$$D = \frac{0,0033 \cdot H_{л min} \cdot V_{max}}{K_{NO_x}}; \quad (17)$$

– для гибридных автомобилей

$$K_I^Г = F + Z \cdot (30 + 0,2 \cdot V_a) + \frac{C}{V_a} + D_r \cdot V_a, \quad (18)$$

$$D_r = \frac{0,0275 \cdot H_{л min} \cdot N_e}{K_{NO_x} \cdot V_{max} \cdot N_{max}}; \quad (19)$$

– для электромобилей

$$K_I^e = F_e + Z \cdot (30 + 0,2 \cdot V_a) + \frac{B}{V_a}, \quad (20)$$

$$B = \frac{2,7 \cdot E_{\text{АКБ}} \cdot C_e \cdot L_{\text{ГАР}} \cdot V_{\text{max}}}{C_{\text{авт}} \cdot L_3}, \quad (21)$$

$$F_e = \left[ \frac{1,8 \cdot S_T}{S_{T\text{min}} \cdot n_3} + \frac{0,324 \cdot E_{\text{АКБ}} \cdot t_p \cdot V_{\text{max}}}{G_a \cdot G_3} \right]. \quad (22)$$

На рисунке 3 показано изменение интегрального показателя качества от средней скорости движения и критерий оценки показателей качества технических решений по моделям автомобилей.

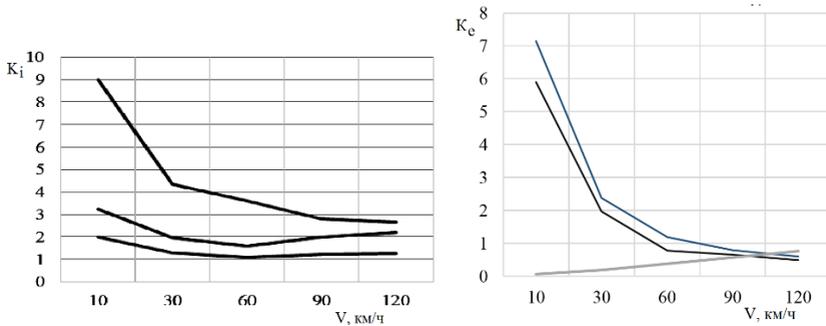


Рисунок 3 – Изменение интегрального показателя качества и критерия экологической безопасности от средней скорости движения автомобилей 1 – Chevrolet Aveo; 2 – Toyota Prius; 3 – Nissan Leaf; 4 – Mitsubishi Lancer

В работе рассмотрены новые возможности повышения эффективности использования легковых автомобилей на основе результатов исследования методов оценки показателей качества на этапе эксплуатации. Методология практической реализации проведенных исследований основана на оценке показателей качества легковых автомобилей на этапе эксплуатации средней скорости движения по критериям безопасности движения, технических решений, экологичности, комфорта и функциональной стабильности, а также сформулированы основные методологические принципы [7, 8, 9].

Интегральный критерий оценки показателей качества автомобилей существенно зависит от условий эксплуатации. Выполненные исследования и предложенный индекс качества автомобилей позволяют получить оперативную информацию об особенностях условий эксплуатации, что создает для автопроизводителей необходимые

условия и возможности по усовершенствованию конструкции автомобилей, поднятия имиджа марки автомобилей и увеличения объема продаж. В таблице 2 приведены коэффициенты корректировки интегрального критерия для базового, гибридного и электромобиля в зависимости от условий эксплуатации.

Таблица 2 – Коэффициенты корректировки интегрального критерия оценки показателей качества от условий эксплуатации

Группа условий эксплуатации	Средняя скорость автомобиля, км/ч	Интегральный показатель качества автомобилей		
		базовый	гибридный	электромобиль
I	100	1,00	1,00	1,00
II	80	1,10	0,95	1,00
III	60	1,40	0,90	0,95
IV	30	1,50	1,00	1,05
V	20	2,25	1,40	1,60

Скорость движения имеет наибольшее влияние на интегральный критерий оценки показателей качества автомобилей. При увеличении скорости движения от 20 до 100 км/ч интегральный критерий оценки показателей качества автомобилей снижается больше чем в 2 раза, гибридных и электромобилей в 1,5–1,6 раза. Итак, проблеме увеличения скоростей движения для автомобилей необходимо уделять особое внимание. Скорость – это резерв, который может значительно повысить показатели оценки качества автомобилей.

Таблица 3 – Результаты интегральной оценки показателей качества

№	Наименование критериев	Обозначение	Модель автомобиля		
			Chevrolet Aveo	Nissan Liaf	Toyota Prius
1	Функциональная стабильность	$K_n$	0,45	0,25	0,4
2	Безопасность движения	$K_б$	0,75	0,46	0,49
3	Экологичность	$K_e$	0,75	–	0,5
4	Комфорт	$K_k$	0,7	0,54	0,54
5	Технических решений	$K_T$	0,31	0,033	0,15
6	Интегральный критерий	$K_I$	2,96	1,28	2,08

Интегральная оценка показателей качества и конкурентоспособности проводилась на основе подходов и математических моделей, изложенных в [10, 11]. Лучший альтернативе (легковому автомобилю) должен соответствовать минимальное значение интегрального критерия качества. Окончательные результаты моделирования и расчетов, позволили оценить показатели качества рассмотренных базовых, гибридных и электромобилей по выделенным критерием, а также получить общую интегральную оценку качества автомобилей, представленные в таблице 3 и на рисунке 3.

На рисунке 4 четко видно, по каким совокупностям показателей электромобили и гибридные превосходят базовые автомобили.

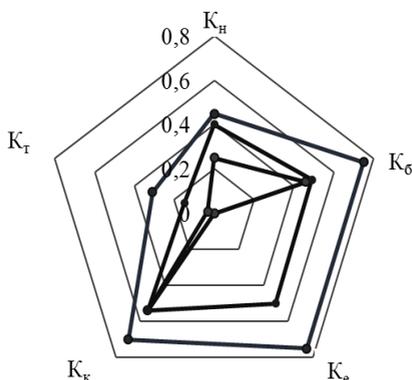


Рисунок 4 – Изменение интегрального показателя качества от средней скорости движения по моделям автомобилей

1 – Chevrolet Aveo; 2 – Toyota Prius; 3 – Nissan Leaf

Практическая реализация результатов, полученных в процессе проведения настоящих исследований обеспечивает следующие основные возможности и условия для:

1) автопроизводителей и их дилеров: оперативное получение информации об особенностях эксплуатации автомобилей и разработки мероприятий по совершенствованию конструкций автомобилей; поднятие имиджа марки автомобилей; увеличение объема продаж;

2) потребителей автотранспортных средств: возможность проведения сравнительной обобщенной оценки; приобретение качествен-

ного автомобиля; формирования и предъявления требований к производителям автомобилей по совершенствованию конструкции и комплектующих.

## **Выводы**

Выполнено обобщение и развитие научных основ актуальной и важной научно-технической задачи по разработке научно-методического аппарата оценки качества легковых автомобилей, что составляет основу концепции определения взаимосвязей, разработки математических моделей и методов оценки и обеспечения качества на этапе эксплуатации;

С увеличением средней скорости движения автомобиля наблюдается увеличение критерия комфорта для всех типов автомобилей в 1,6–2 раза, критерий оценки экологической безопасности базовых автомобилей уменьшается в 9–11 раз, а гибридных автомобилей увеличивается в 8–10 раз. При максимальной средней скорости движения критерии оценки экологической безопасности базовых и гибридных автомобилей уровне. Критерий оценки функциональной стабильности базовых, гибридных и электромобилей с увеличением средней скорости движения уменьшается в 10–11 раз. Но следует отметить, что критерий оценки качества функциональной стабильности базовых автомобилей в 1,3–1,5 раза больше, чем гибридных автомобилей и в 1,8–2,0 раза больше чем электромобилей.

## **Литература**

1. Синергетичний автомобіль. Теорія і практика / Бажинов О. В., Смирнов О. П., Сериков С. А., Двадненко В. Я. – Харків : ХНАДУ. 2011. – 236 с.
2. Бажинов, А. В., Двадненко, В. Я., Сериков, С. А. Повышение экономичности и экологической безопасности транспортных средств с гибридными силовыми установками. Наукові нотатки ЛНТУ : міжвуз. зб.наук. пр. 2010. – Вип. 28. – С. 40–45.
3. Zayatrov, A., Kozlovskiy, A. Software complex for measuring operational reliability of electrical equipment of cars. Scientific enquiry in the contemporary world: theoretical basics and innovative approach. FL, USA, L&L Publishing, 2012. – P. 101–103.

4. Строганов, В. И., Козловский В. Н. Концепция обеспечения качества и надежности электромобилей и автомобилей с гибридной силовой установкой. Электроника и электрооборудование транспорта. 2012. – № 5. – С.49–55.

5. Побережный, В. Н., Ременцов, А. Н., Зенченко, В. А. Методический подход к интегральной оценке технико-эксплуатационных свойств грузовых автомобилей импортного производства, эксплуатируемых в условиях Крайнего Севера. Проблемы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта: сб. труд., 2005. – С. 16–20

6. Островцев, А. Н., Кузнецов, Е. С., Румянцев, С. И. Критерии оценки и управления качеством автотранспортных средств на стадии проектирования, производства и эксплуатации. – М. : МАДИ, 1981. – 95 с.

7. Борисенко, А. О., Бажинова, Т. О. Експлуатаційні властивості гібридних автомобілів: монографія. / Х. : ФОП Бровін О.В., 2016. – 104 с.

8. Bazhinova, T. O., Nechytailo, J. A., Vesela, M. A. The energy estimation of transportation vehicles. Науковий вісник «Національного гірничого університету». 2016. – № 6(156). – с. 84–88.

9. Smirnov, O. P., Bazhinova, T. O., Veselaya, M. A. Substantiation of Rational Technical & Economic Parameters of Hybrid Car. Automation, Software Development & Engineering. Vol. 1 URL: <http://asdej.xyz/substantiation-of-rational-technical-economic-parameters-of-hybrid-car/> 2017.

10. Гібридні автомобілі : монографія / Бажинов О. В., Смирнов О. П., Серіков С. А. та ін. Харків, ХНАДУ, 2008. – 327 с.

11. Kia tops J. D. Power quality rankings amid shake-up. AutoNews. J. D. Power and Associates. URL : <http://www.autonews.com/article/20170621/OEM01/170629948/2017-j-d-power-iqs-kia>.

Статья поступила 15.11.2021

## **СТРУКТУРА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ СТУПЕНЧАТОЙ ТРАНСМИССИЕЙ ГОРНОЙ МАШИНЫ**

*Таяновский Г. А.*, к.т.н., доцент, *Басалай Г. А.*, ст. преп.  
Белорусский национальный технический университет  
г. Минск, Беларусь, e-mail: *tge52@mail.ru*

## **STRUCTURE OF ALGORITHM FOR CONTROLLING STEPS TRANSMISSION OF MINING MACHINE**

*G. Tayanousky*, Ph.D. in Engineering, Associate Professor,  
*G. Basalay*, Associate Professor  
Belarusian national technical University, Minsk, Belarus,  
e-mail: *tge52@mail.ru*

*Актуальной остается задача обоснования алгоритмов автоматизированного управления трансмиссиями машин с дизельным двигателем, для обеспечения высокой экономичности и производительности машинных транспортно-технологических агрегатов на базе таких машин, в частности, предназначенных для условий автономной эксплуатации в беспилотном варианте в горнодобывающей отрасли, в карьерах и шахтах.*

*Рассмотрена вариативность существующих систем алгоритмов управления ступенчатыми трансмиссиями горных машин с переключением передач с помощью гидроподжимных фрикционных муфт бустерного типа и предложена принципиальная схема варианта структуры алгоритма переключения.*

*Ключевые слова: мобильные горные машины, ступенчатые трансмиссии, структура алгоритмов переключения передач.*

*The task of substantiating algorithms for automated control of transmissions of car with diesel engines remains urgent in order to ensure high*

*efficiency and productivity of such machines in autonomous operation in an unmanned version in the mining industry in quarries and mines.*

*Variation of existing systems of algorithms of control of stepped transmissions of mining machines with shift of gears with the help of hydraulic compression friction couplings of booster type is considered, as well as a schematic diagram of a variant of the shift algorithm structure.*

*Key words: mobile mining machines, step-by-step transmissions, structure of the gearshift algorithms.*

## **Введение**

Описание электронной системы управления (ЭСУ) ступенчатыми трансмиссиями горных колесных машин включает характеристики ее аппаратной и алгоритмической структуры.

Цель данной статьи – на основе анализа таких структур у ведущих производителей колесной техники [1–4] выделить типовые их элементы и для распределенной структуры системы автоматизированного управления горной машиной описать блок-схему рационального алгоритма управления переключением передач КП такой машины с CAN-сетью и с каналами с широтно-импульсной модуляцией сигналов.

## **1. Проблематика управления трансмиссией горной колесной машины**

В развитых странах на горных колесных погрузочно-доставочных и других специальных машинах доминируют ступенчатые трансмиссии с переключением механических передач под нагрузкой фрикционными гидроподжимными муфтами бустерного типа. Получают развитие двухпоточные гидромеханические приводы, а также машины с бесступенчатыми гибридными дизель-электро-механическими трансмиссиями. Ведутся изыскания и опытно-конструкторские работы по созданию машин с электропитанием от накопителей в виде мощных аккумуляторов или супер-конденсаторов с сохранением, по требованиям безопасности эксплуатации в специфических горных условиях, отработанных конечных редукторных частей привода колес машины.

Актуальной остается задача обоснования алгоритмов автоматизированного управления трансмиссиями машин с дизельным двигателем, для обеспечения высокой экономичности и производительности машинных транспортно-технологических агрегатов на базе таких машин, в частности, предназначенных для условий автономной эксплуатации в беспилотном варианте в горнодобывающей отрасли, в карьерах и шахтах.

Представляет практический интерес очерчивание актуальных задач управления трансмиссией рассматриваемых горных машин для выбора направления построения процедурной модели адаптивного многозадачного ситуационного управления их трансмиссией.

Изыскания включали:

1. Формулирование энергетически и технологически рациональных целей управления горной машиной, для спектра выполняемых ею технологических операций, в агрегате с комплектом быстросменного агрегируемого рабочего оборудования, и характерных ситуаций или эпизодов-обстановок движения, с учетом требований безопасности;

2. Составление описания наилучших, для достижения целей, режимов работы горной машины в составе машинного транспортно-технологического агрегата (МТТА) по тяге, скорости и расходу энергоносителей;

3. Выбор стратегии удержания ДВС гибридной силовой установки в области наименьших расходов топлива, а в случае электропривода от электро-накопителей – выбор способа использования привода в зоне наибольших значений КПД электрической части, обоснование вида критерия оценки эффективности управления для гибридных и электро-трансмиссий;

4. Определение необходимой внешней механической характеристики частотно-управляемого мотор-генератора и тягового электрического двигателя;

5. Определение рационального поля рабочих точек для принятой структурной схемы моторно-трансмиссионно-двигательной установки (МТДУ) горной машины;

6. Выбор информационных переменных для создания ситуационной системы управления и идентификации-мониторинга режимов работы горной машины и системы управления, в том числе в случае беспилотного варианта;

7. Описание логики управления МТДУ, разработка структурной функциональной и алгоритмической схем системы управления трансмиссией.

## **2. Структура системы управления трансмиссии горной колесной машины**

Структура аппаратного обеспечения управления объектами – современными горными машинами и МТТА на их базе минимально включает, как правило, пять модулей-блоков, объединенных последовательной CAN-шиной для связи цифровыми кодами по специальному протоколу. Это модули, которые у разных производителей называют по-разному, но по функциональному признаку их можно условно обозначить как: модуль датчиков, модуль исполнительных элементов, модуль отображения информации, модуль выбора режимов управления, модуль генерирования команд управления. Для упрощения, удешевления и повышения быстродействия и надежности модули параллельно подключены к источнику питания, а в систему CAN-сети соединены электропроводкой в виде витой пары. ЭСУ использует сигналы от датчиков на двигателе, сцеплении, коробке передач (КП), ведущих мостах, валах отбора мощности (ВОМ).

CAN-сеть работает путем реализации алгоритмического обеспечения, которое делится на несколько иерархических уровней, чаще всего на два:

а) алгоритмы выбора, либо по виду рабочей операции, либо по критериям стабилизации, диапазона передач КП, на которых выбранный аспект будет осуществляться во время работы;

б) алгоритмы управления гидроподжимными фрикционными муфтами (ГПФМ) фрикционов КП в переходных процессах переключения передач без разрыва потока мощности, без рывков остова машины, с минимально возможной тепловой и динамической нагруженностью трансмиссии и учетом выполнения других требований [1, 16].

В системах автоматики, как правило, во всех микроконтроллерах встроены один или несколько формирователей каналов с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ-каналы), которые при передаче сигналов по линиям связи используют способ кодирования аналогового

сигнала изменением ширины (длительности) прямоугольных импульсов несущей частоты. При передаче нескольких сигналов в CAN-шине они различаются принимающими модулями по двоичным кодам-меткам.

До начала работы мобильной горной машины водитель-оператор задает с помощью модуля выбора вид рабочей технологической операции. Из анализа зарубежных систем автоматического управления (САУ) моторно-трансмиссионно-двигательной установкой (МТДУ) следует, что различные алгоритмы управления используют для 3–4 групп операций. Это обычно следующие группы операций:

- 1) транспорт на высшем скоростном диапазоне;
- 2) работа с энергоемким технологическим оборудованием на особо низких скоростях перемещения;
- 3) работы по предписанному циклическому маршруту на малых скоростях с большим числом маневров и строгими ограничениями на габаритную полосу движения;
- 4) обеспечение наибольшей проходимости.

Для обеспечения рациональности перечисленных задаваемых видов работ машины с ними, как правило, коррелируют и целесообразные критерии стабилизации, которые также выбираются в ЭСУ. При этом большинство критериев оптимизации, для которых предлагаются алгоритмы управления, можно отнести к обеспечению режимов стабилизации:

- а) мощности в заданных пределах;
- б) загрузки двигательной установки (ДУ) по крутящему моменту;
- в) скорости движения без изменения положения педали и рычага «газа» ДУ;
- г) нахождения ДУ в зоне наиболее экономичного расходования энергии по многопараметровой характеристике;
- д) частоты вращения вала отбора мощности и другие.

### **3. Рациональный алгоритм управления переключением передач горной колесной машины**

Обзор используемых в мире алгоритмов управления переключением передач показывает их разнообразие, что определяется во многом выбранными разработчиками логикой и признаками достижения наилучших показателей качества переключения передач. Так как

у разных разработчиков свои отличающиеся представления о номенклатуре и удовлетворяющих значениях измерителей качества, то это находит отражение в многообразии патентов на способы управления ступенчатыми трансмиссиями [1–10].

В качестве элементов переключения передач в вальных КП традиционных колесных горных машин используются:

- передвижные каретки зубчатых муфт;
- синхронизированные зубчатые муфты;
- гидродожимные фрикционные муфты бустерного типа в составе фрикционов;
- в планетарно-вальных КП используют фрикционные тормоза элементов планетарных передач или управляемую объемно-гидромеханическую передачу (ОГМП).

Если условно разделить КП горной машины на диапазонную часть и на часть режимов движения, то режимы движения обычно переключают либо передвижными каретками, либо синхронизированными муфтами. В случае беспилотного управления и необходимости особо низких скоростей перемещения горной машины предпочтительно использование двухпоточных гидроходоуменьшителей или многопоточных ОГМП.

Применительно к динамике горной машины в режиме стабилизации загрузки двигателя по крутящему моменту, при использовании в ЭСУ переключением передач КП только информационных переменных: сигнала от датчика частоты вращения, сигналов от датчиков положения педали «газа» и рычага ручной установки подачи топлива в ДУ, возможная блок-схема алгоритма управления переключением передач представлена на рисунке 1.

Этот алгоритм реализован как программное приложение (ПП), моделирующее динамические процессы трансмиссии, двигателя и системы управления. ПП включает ряд модулей, описывающих механико-математическую модель горной машины и скомпилированных в один исполнимый файл.

Программа с помощью экранного иерархического интерфейса позволяет задать:

- все параметры динамической системы горной несущей машины и МТГА на ее основе;
- виды технологических операций;

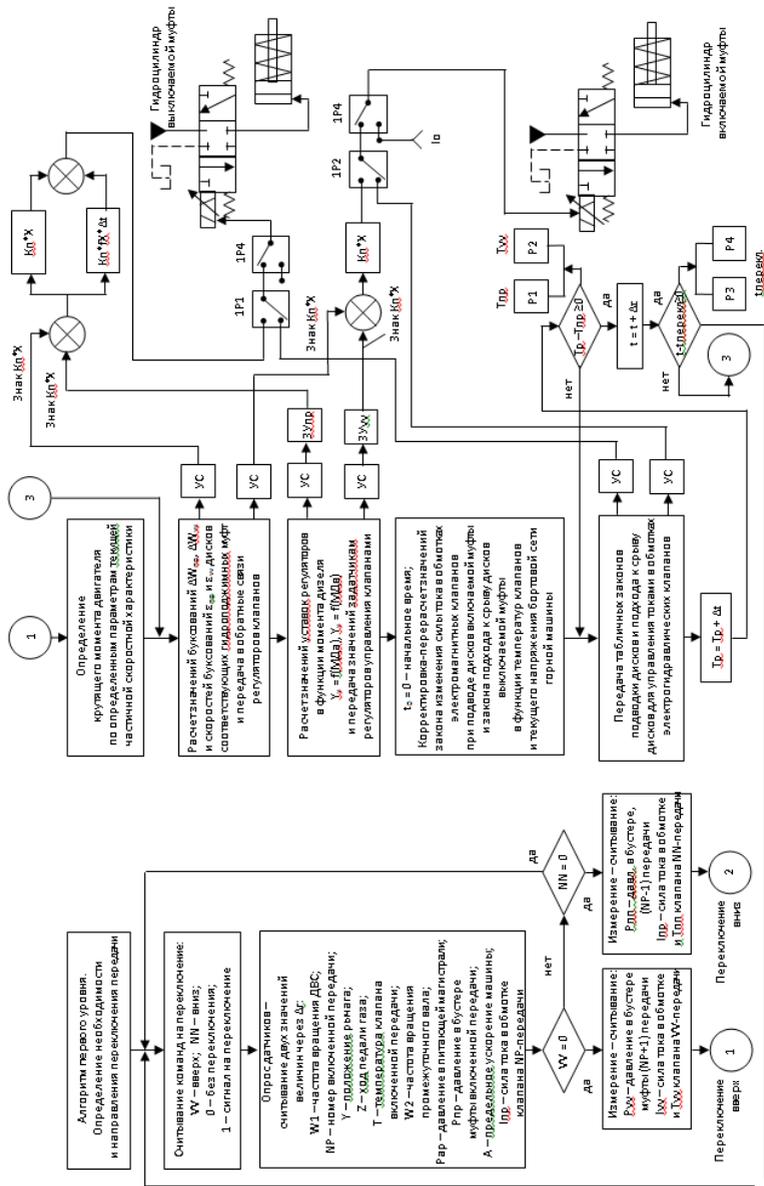


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма управления переключением передач горной колесной машины

- базовые законы изменения давления во включаемой и выключаемой ГПФМ фрикционов КП;
- параметры агрегируемого технологического оборудования (или рабочей машины) и крюкового усилия;
- параметры дизельного двигателя и его скоростную внешнюю характеристику.

Программа позволяет выбрать номера базовых законов включения и выключения муфт, номера диапазона и передачи, с которых начинается трогание и разгон МТТА, задать времена перекрытия и запаздывания в работе фрикционных муфт, длительности процесса переключения.

## **Заключение**

Выполнен анализ распределенных структур аппаратного и программного обеспечений СУ трансмиссиями горных машин.

Разработана блок-схема рационального алгоритма автоматизированного управления переключением передач с ГПФМ в трансмиссии горной машины, которая реализована в математической модели горной машины с ЭСУ на ЭВМ.

## **Литература**

1. [https://www.vost-tech.ru/produkcija/katalog\\_produkcii/samosvaly/ka-rernyj\\_samosval/785d/](https://www.vost-tech.ru/produkcija/katalog_produkcii/samosvaly/ka-rernyj_samosval/785d/).
2. [https://www.cat.com/ru\\_RU/products/new/equipment/off-highway-trucks/off-highway-trucks/18256812.html](https://www.cat.com/ru_RU/products/new/equipment/off-highway-trucks/off-highway-trucks/18256812.html).
3. [https://www.volvoce.com/-/media/volvoce/global/products/rigid-haulers/brochure\\_s/brochure\\_r45d\\_r60d\\_r70d\\_t2\\_t3\\_ru\\_1\\_20055970\\_b.pdf?v=LY1APw](https://www.volvoce.com/-/media/volvoce/global/products/rigid-haulers/brochure_s/brochure_r45d_r60d_r70d_t2_t3_ru_1_20055970_b.pdf?v=LY1APw).
4. <https://www.ritchiespecs.com/model/volvo-170d-wheel-loader>.
5. <http://www.belaz.by/catalog/products/dumptrucks/>.
6. <https://www.volvoce.com/belarus/ru-by/specurotech/products/rigid-haulers/>.
7. <http://istk.ru/tech/kar-erny-j-avtosamosval-komatsu-hd-1500-5/>.
8. Диагностирование гидромеханических передач мобильных машин / Н. Н. Горбатенко, А. Н. Егоров, В. В. Региня, С. А. Рынкевич,

В. П. Тарасик, Г. Л. Антипенко; под общ. ред. В. П. Тарасика. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2010. – 511 с.

9. Гируцкий, О. И., Тарасик В. П. Создание электронных систем управления и диагностирования гидромеханических передач мобильных машин: этапы, пути и перспективы // Журнал ААИ. 2013. – № 4. –С. 18–23.

10. Terano, T., Asai, K., Sugeno, V. Applied Fuzzy Systems. – New York : APProfessional, 1994. – 302 p.

11. Дентон, Т. Автомобильная электроника / пер. с англ. В. М. Александрова. – М. : НТ Пресс, 2008. – 586 с.

12. Косенков, А. А. Диагностика автоматических коробок передач и трансмиссий. – Ростов н/Д : Феникс, 2003. – 224 с.

13. Fransman, M. Japan Computer and Communications Industry. The Evolution of Industrial Giants and Global Competitiveness. Oxford University Press, 2005. – 540 p.

14. Гидропневмоавтоматика и гидропривод мобильных машин. Теория систем автоматического управления / В. П. Автушко [и др.]; под ред. Н. В. Богдана, Н. Ф.Метлюка. – Минск : НП ООО «ПИОН», 2001. – 396с.

15.Тарасик, В. П. Интеллектуальные системы управления авто-транспортными средствами/ В. П. Тарасик, С. А. Рынкевич. – Мн. : УП «Технопринт», 2014. – 512 с.

16. Таяновский, Г. А. Имитационная модель сельскохозяйственного тракторного агрегата для исследования динамических нагрузок в трансмиссии и плавности хода / Г. А. Таяновский, Ю. Е. Атаманов, В. Танась. – Журнал Комиссии по моторизации и энергетике в сельском хозяйстве Люблинского отделения Польской Академии наук, VII/2007. – с. 225–235. (Georgij Tajanowskij, Atamanov Jurij, Wojciech Tanas. Imitating model of the agricultural tractor unit for research of dynamic loadings in transmission and smoothness of a motion. TeKa Komisji Motoryzacji I Energetyki Rolnictwa LO PAN, VII/2007. – P. 225–235).

Статья поступила 15.11.2021

## **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ ПОЛНОПРИВОДНОГО ТРАКТОРА**

*Поварехо А. С.*, канд. техн. наук, доц.,  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: *povarekho.bntu.by*

## **FUNCTIONAL CHARACTERISTICS BRAKE SYSTEM OF A FOUR-WHEEL DRIVE TRACTOR**

*A. Pavarekha*, PhD in Engineering, Associate Professor,  
Belarusian national technical University, Minsk, Belarus,  
e-mail: *povarekho.bntu.by*

*Ряд конструктивных решений для полноприводных колесных тракторов, направленные на повышение эффективности их торможения, приводят к увеличению тепловой нагруженности фрикционных пар тормозных механизмов, муфт управления приводом дополнительного ведущего моста, а также силовой нагруженности элементов трансмиссии.*

*Работоспособность и выходные характеристики фрикционных муфт и тормозных устройств существенным образом зависят от температурного режима их работы, который определяется величиной энерговыделения в последних и условиями отвода тепла. Таким образом, актуальным является оценка энерговыделения во фрикционных узлах, задействованных в процессе торможения. При этом энергонагруженность этих узлов зависит от эффективности торможения, темпа изменения передаваемого момента и согласования работы фрикционных узлов.*

*Данная статья посвящена исследованию влияния указанных выше параметров на выходные характеристики процесса торможения и*

оценке тепловой нагруженности тормозных механизмов и муфты включения переднего ведущего моста (ПВМ).

Ключевые слова: трактор, тормозные механизмы, ведущий мост, привод, тепловая нагруженность, управление, гидропривод, динамические характеристики.

*A number of design solutions for four-wheel drive wheeled tractors, aimed at improving the efficiency of their braking, lead to an increase in the thermal load of friction pairs of braking mechanisms, drive control clutches of the additional drive axle, as well as the power load of transmission elements.*

*The operability and output characteristics of friction clutches and braking devices depend significantly on the temperature regime of their operation, which is determined by the amount of energy release in the latter and the conditions of heat removal. Thus, it is relevant to assess the energy release in the friction units involved in the braking process. At the same time, the energy load of these nodes depends on the braking efficiency, the rate of change of the transmitted torque and the coordination of the operation of the friction nodes.*

*This article is devoted to the study of the influence of the above parameters on the output characteristics of the braking process and the assessment of the thermal load of the braking mechanisms and the coupling of the front drive axle.*

Keywords: tractor, braking mechanisms, drive axle, drive, thermal loading, control, hydraulic drive, dynamic characteristics.

## **Введение**

В настоящее время все в большей степени прослеживается тенденция расширения комплекса работ, выполняемого колесными тракторами, что позволяет обеспечить более высокую их круглогодичную загрузку. Все шире потребители используют тракторную технику для выполнения транспортных работ при осуществлении местных перевозок в целях сокращения затрат на использование автомобильной техники. Скорости движения тракторов достигают 40 км/ч, некоторые имеют скоростной диапазон до 50 км/ч и выше.

Рост транспортных скоростей тракторов сдерживается рядом проблем. Это касается в первую очередь систем подрессоривания, которые должны обеспечить удовлетворительные условия труда оператора, и тормозных систем, обеспечивающих безопасность движения трактора, в том числе в транспортном потоке на дорогах общего пользования. Требования, предъявляемые к тормозным системам, регламентируются рядом нормативных документов [1, 2].

Основными направлениями совершенствования тормозных систем тракторов являются [3]:

- повышение эффективности торможения и устойчивости движения за счет обеспечения рационального распределения тормозных сил между колесами;
- увеличение надежности работы и долговечности тормозных механизмов.

Одним из важных путей повышения тормозных качеств пропашных тракторов является торможение всеми колесами. Однако оборудование передних колес тормозными механизмами, размещенными в колесах по принятой в автомобилестроении схеме, для таких тракторов связано с принципиальными усложнениями конструкции.

В данной статье рассматриваются вопросы, касающиеся оценки выходных характеристик тормозных систем полноприводных тракторов, оборудованных тормозными механизмами на заднем мосту.

## **Оценка эффективности функционирования тормозных систем полноприводных тракторов**

Анализ конструкции ходовых систем универсально-пропашных тракторов показывает, что порталная конструкция как ведомых, так и ведущих передних мостов пропашных тракторов, обусловленная необходимостью высокого агротехнического просвета, вносят дополнительные трудности: при торможении передними колесами плечо тормозных сил (от опорной поверхности до оси балки моста) значительно увеличивается по сравнению с конструкциями, у которых колеса расположены соосно с балками мостов. Поэтому для использования передних колес в тормозном режиме требуется усиление конструкции и, следовательно, увеличение металлоемкости.

Рациональное распределение тормозных сил обеспечивается при реализации колесами транспортного средства одинаковых удельных

тормозных сил, определяемых как отношение тормозной силы к нормальной реакции на колесе [4]. Для полноприводных колесных тракторов данный эффект достигается в результате блокирования при торможении межосевого привода. Различные варианты конструктивного исполнения тормозной системы при подключении ПВМ представлены на рисунке 1. Принцип регулирования тормозных сил у них идентичен, а отличие состоит в расположении и количестве тормозных механизмов.

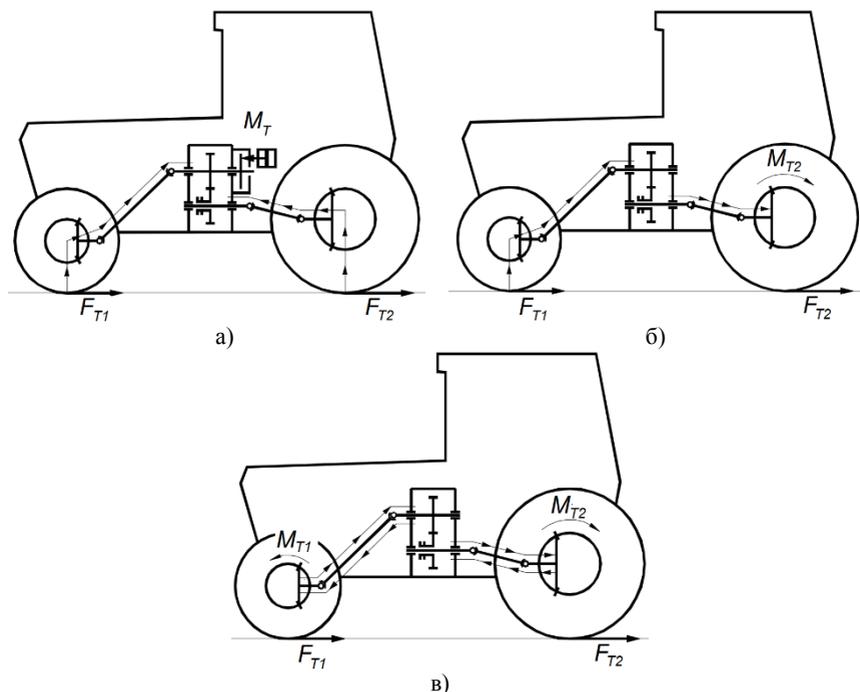


Рисунок 1 – Схемы систем регулирования тормозных сил при блокированном межосевом приводе

На рисунке 1, а приведена схема, у которой тормозной механизм расположен на валу раздаточной коробки. Тормозные силы колес переднего и заднего моста создаются моментом, реализуемым тормозным механизмом. При этом происходит циркуляция момента от колес переднего и заднего моста к тормозному механизму раздаточной

коробки, что приводит к нагружению межосевого привода, связывающего раздаточную коробку с передним и задним мостами.

Особенность схемы, представленной на рисунке 1, б состоит в том, что тормозные механизмы установлены на заднем мосту трактора, а за счет включения межосевого привода осуществляется торможение как задних, так и передних колес. В данном случае также происходит перераспределение момента от тормозного механизма к колесам переднего моста, что нагружает межосевой привод.

Наиболее рациональной, с точки зрения нагруженности трансмиссии, является третья схема (рисунок 1, в). Тормозные механизмы располагаются на колесах переднего и заднего мостов, а регулирование тормозных сил осуществляется за счет блокирования межосевого привода. При этом перераспределение моментов может осуществляться как с тормозных механизмов передних колес на задние колеса, так и с тормозных механизмов заднего моста на передние колеса. Направление перераспределяющегося момента зависит от многих факторов: соотношения эффективности тормозных механизмов передних и задних колес, развесовки трактора, вида агрегатирования, перераспределения при торможении весовой нагрузки, сцепных качеств передних и задних колес и т. д.

Анализ конструкций трансмиссий полноприводных универсально-пропашных тракторов показал, что для них наиболее целесообразной является схема, приведенная на рисунке 1, б [5]. Данное техническое решение не увеличивая металлоемкость трактора, существенно повышает эффективность торможения за счет использования сцепного веса трактора, приходящегося на передние колеса. Кроме того, принудительное включение межосевого привода при торможении приводит к взаимосвязи угловых скоростей колес переднего и заднего мостов, а, следовательно, к взаимосвязи их скольжений, что способствует рациональному распределению тормозных сил по мостам полноприводного трактора независимо от вида агрегатирования и эффективности торможения.

Однако следует учитывать, что величина перераспределяющегося момента дополнительно нагружает элементы привода и самого переднего моста. При этом с учетом перераспределения веса при торможении с заднего моста на передний величина момента по сцепле-

нию колес может превышать его значения в тяговом режиме, что требует повышения прочности узлов и деталей ПВМ. Также возрастает энергонагруженность самих рабочих тормозных механизмов.

Ограничение нагрузок на передний мост обеспечивается установкой в приводе фрикционной муфты, которая при превышении перераспределяющимся моментом определенного значения пробуксовывает.

Таким образом в процессе торможения полноприводного трактора с подключаемым с помощью фрикционной муфты передним мостом, имеются две группы фрикционных узлов, которые пробуксовывают в процессе торможения, поглощая кинетическую энергию движения трактора – тормозные механизмы и муфта подключения ПВМ.

Как известно работоспособность и выходные характеристики фрикционных муфт и тормозных устройств существенным образом зависят от температурного режима их работы, который определяется величиной энерговыделения в последних и условиями отвода тепла [6, 7]. Оценка тепловых режимов работы фрикционных устройств может быть произведена по величинам работы трения и изменению мощности трения в процессе буксования их фрикционных пар. С другой стороны, длительность буксования и реализуемый при этом фрикционный момент определяются темпом и согласованностью включения тормозных механизмов муфты подключения переднего моста.

В качестве привода к тормозным механизмам тракторов «Беларусь» применяется либо механический, либо гидростатический привод, обеспечивающие прямопропорциональную связь между перемещением (усилием) педали и развиваемым тормозным моментом. Привод муфты переднего моста может осуществляться механически или, что имеет место в современных моделях тракторов, с помощью гидравлического привода от гидронасоса. В последнем случае управление осуществляется с помощью электрогидравлических клапанов, что позволяет регулировать запаздывание, а за счет изменения проходного сечения клапана и время включения фрикционной муфты. Таким образом, использование электрогидравлического привода позволяет задавать алгоритм ее включения, согласуя его в процессе

торможения с темпом включения тормозных механизмов, обеспечивая опережающее включение муфты ПВМ, что снижает ее энергонагруженность и снижает температуры пар трения.

Для анализа характеристик электрогидравлического привода муфты ПВМ на основе рекомендаций [8] была составлена математическая модель и рассчитаны динамические характеристики электрогидравлического привода.

На рисунке 2 приведены динамические характеристики электрогидропривода муфты ПВМ для электрораспределителей с различным значением условного прохода. С качественной точки зрения характеристики имеют типичный вид для исполнительных частей гидросистем с насосным приводом. В начальный период времени имеет место незначительное повышение давление и задержка его дальнейшего роста, связанная с заполнением соединительных трубопроводов и полости нажимного механизма фрикционной муфты. После заполнения полостей происходит резкое увеличение давления, которое приводит к замыканию пар трения.

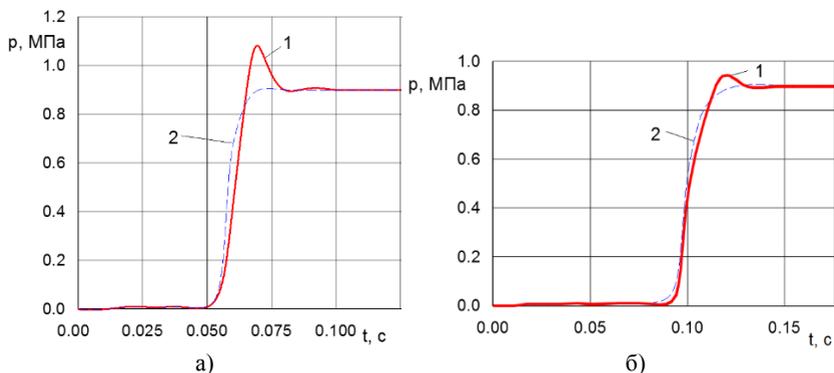


Рисунок 2 – Динамические характеристики электрогидравлического привода муфты ПВМ для гидрораспределителей с различными условными проходами а) 8 мм; б) 5 мм

Время срабатывания привода, как показали расчеты, зависит от условного прохода гидрораспределителя. Для условного прохода 8 мм он составляет 0,07 с, а для условного прохода 5 мм – 0,12 с. Приведенные на графиках зависимости под номером 1 соответ-

ствуют месту расположения электрогидрораспределителя, аналогично серийному. Зависимости под номером 2 соответствуют расположению распределителя непосредственно на входе в муфту ПВМ. В последнем случае имеет место более плавное изменение давления без его заброса при максимальном значении. С точки зрения времени срабатывания существенной разницы для кривых 1 и 2 не отмечено, что объясняется незначительной разницей заполняемых в системе объемов при изменении длины соединительных трубопроводов.

Для оценки влияния характеристик привода муфты ПВМ на энергонагруженность ее пар трения, а также на выходные характеристики процесса торможения были проведены исследования динамики торможения трактора Беларус-1221, которые базировались на приведенных в предыдущих работах математических моделях [8].

Представленные на рисунке 3 графические зависимости позволяют определить энергонагруженность тормозных механизмов и муфты подключения ПВМ при различных значениях моментов, развиваемых тормозными механизмами и передаваемых муфтой ПВМ. При этом рассматривались следующие соотношения времени срабатывания тормозного привода и включения ПВМ: для тормозных механизмов заднего моста  $t_n = 0,15$  с; для фрикционной муфты ПВМ  $t_n = 0,25$  с. Указанные соотношения характерны для серийной тормозной системы, реализующей подключение ПВМ в процессе торможения. Как следует из приведенных зависимостей, при увеличении эффективности тормозных механизмов заднего моста происходит увеличение энерговыделения в муфте подключения ПВМ. При относительно невысоких значениях  $M_T$  энергонагруженность муфты ПВМ близка к нулю. Начиная с некоторого значения  $M_T$  наблюдается существенный рост энерговыделения. При этом с увеличением эффективности рабочей тормозной системы начало зоны повышенной энергонагруженности муфты ПВМ смещается вправо.

Проведенные расчетные исследования электрогидравлического привода ПВМ показали, что энерговыделение во фрикционных парах существенно ниже приведенных на рисунке 3 значений и наибольшие значения отмечены для электрораспределителя с условным проходом 5 мм при  $M_T = 3$  кН·м:  $A_{тр} = 2,71$  кДж и  $N_{max} = 61$  кВт. Для распределителя с условным проходом 8 мм аналогичные значения в несколько раз ниже. Это объясняется тем, что при использовании

электрогидравлической системы замыкание муфты по времени осуществляется до достижения тормозными механизмами максимальной эффективности и темп нарастания перераспределяющегося момента ниже темпа роста момента муфты ПВМ.

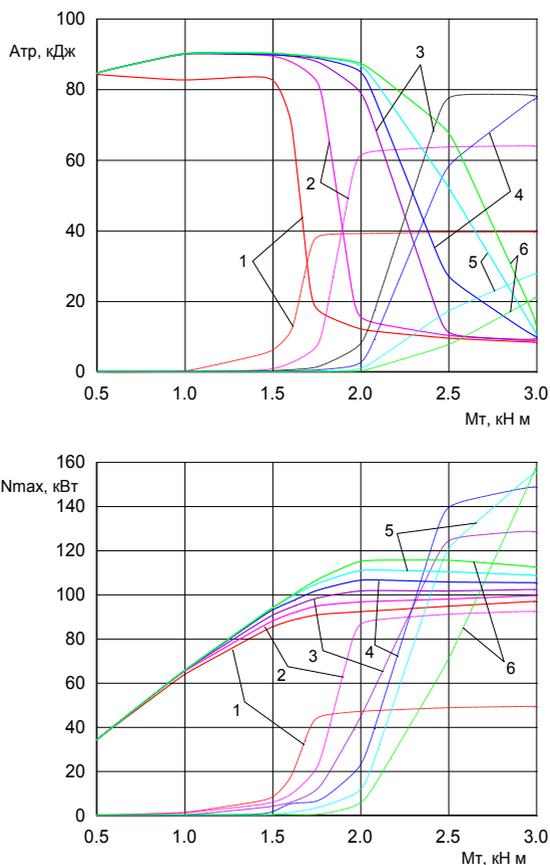


Рисунок 3 – Зависимости энергонагруженности фрикционных узлов трансмиссии трактора Беларус-1221 от моментов, реализуемых тормозными механизмами и муфтой подключения ПВМ

- – тормозные механизмы;      - - - - - – муфта ПВМ;  
 1 –  $M_{ПВМ} = 0,2 \text{ кН}\cdot\text{м}$ ; 2 –  $M_{ПВМ} = 0,4 \text{ кН}\cdot\text{м}$ ; 3 –  $M_{ПВМ} = 0,6 \text{ кН}\cdot\text{м}$ ;  
 4 –  $M_{ПВМ} = 0,8 \text{ кН}\cdot\text{м}$ ; 5 –  $M_{ПВМ} = 1,0 \text{ кН}\cdot\text{м}$ ; 6 –  $M_{ПВМ} = 1,2 \text{ кН}\cdot\text{м}$

## Заключение

Использование электрогидравлического привода позволяет исключить влияние субъективных факторов на темп включения муфты ПВМ, с одной стороны, а с другой стороны задавать алгоритм ее включения, согласуя его в процессе торможения с темпом включения тормозных механизмов, обеспечивая опережающее включение муфты ПВМ, что снижает ее энергонагруженность и повышает долговечность пар трения.

Время срабатывания привода, как показали расчеты, зависит от условного прохода гидрораспределителя. Для условного прохода 8 мм он составляет 0,07 с, а для условного прохода 5 мм – 0,12 с.

Проведенные расчетные исследования электрогидравлического привода ПВМ показали, что энерговыделение во фрикционных парах существенно ниже значений для серийного привода и наибольшие значения отмечены для электрораспределителя с условным проходом 5 мм при максимальных значениях тормозного момента.

## Литература

1. ГОСТ 12.2.019-2015 Система стандартов безопасности труда. Тракторы и машины самоходные сельскохозяйственные. Общие требования безопасности. – М. : Стандартинформ, 2016.
2. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств категорий М, N и O в отношении торможения : Правила ЕЭК ООН N 13 (11) / Пересмотр 8 : взамен Правил ЕЭК ООН N 13 (11) / Пересмотр 7 : введ. 01.03.2017. – Минск : Госстандарт : БелГИСС, 2017. – II, 337 с.
3. Тракторные поезда / [П. П. Артемьев, Ю. Е. Атаманов, Н. В. Богдан и др.]; Под ред. В. В. Гуськова. – М. : Машиностроение, 1982. – 183 с.
4. Поварехо, А. С., Рахлей, А. И. Исследование распределения моментов в трансмиссиях колесных машин при торможении // Автомобиле-и тракторостроение: материалы междунар. науч.-практ. конф. / БНТУ. – Минск, 2019. – Т. 1. – с. 275–278.
5. Руководство по эксплуатации тракторов «БЕЛАРУС-1221.2/1221В.2/1221.3». РУП «Минский тракторный завод», 2009.

6. Шарипов, В. М. Конструирование и расчет тракторов : учебник для студентов вузов. 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2009. – 752 с.

7. Чичинадзе, А. В., Берлинер, Э. М., Браун, Э. Д., Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А. В. Чичинадзе, Э. М. Берлинер, Э. Д. Браун и др.; Под общ. ред. А. В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 2003. – 575 с.

8. Метлюк Н. Ф., Автушко В. П. Динамика пневматических и гидравлических приводов автомобилей. – М. : Машиностроение, 1980. – 231 с.

9. Бойков, В. П., Грибко, Г. П., Поварехо, А. С., Рахлей, А. И. Математическое моделирование: Метод. указания по выполнению практических курсовых работ для студентов специальностей 1-37 01 04 «Многоцелевые гусеничные и колесные машины», 1-37 01 03 «Тракторостроение», 1-37 01 05 «Городской электрический транспорт». – Мн. : БНТУ, 2008. – 60 с.

Статья поступила 23.11.2021

**ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ  
СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ  
УСТОЙЧИВОСТИ ПОДЪЕМНОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ НА БАЗЕ  
АВТОМОБИЛЬНОГО ШАССИ**

**Бойков В. П.**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф., **Поздняков Н. А.**<sup>1</sup>, ст. преп.,  
**Ковалев П. В.**<sup>2</sup>, гл. конструктор,

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: *trak\_atf@bntu.by*

<sup>2</sup>ООО «Пожснаб», г. Борисов, Республика Беларусь,  
e-mail: *tech@pozhsnab.com*

**SUBSTANTIATION OF THE DESIGN SCHEME  
FOR THE STATIC AND DYNAMIC STABILITY  
OF LIFTING EQUIPMENT BASED  
ON AN AUTOMOBILE CHASSIS**

**V. Boykov**<sup>1</sup>, Doctor of technical Sciences, Professor,  
**N. Pozdnyakov**<sup>1</sup>, senior lecturer, **P. Kovalev**<sup>2</sup>, chief designer,  
<sup>1</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus,  
e-mail: *trak\_atf@bntu.by*

<sup>2</sup>«Pozhsnab» LLC, Borisov, Republic of Belarus,  
e-mail: *tech@pozhsnab.com*

*В статье рассматриваются вопросы оценки конструкции подъемного пожарного оборудования на соответствие показателям безопасности, что необходимо на ранних стадиях проектирования. Это касается, прежде всего, показателей статической и динамической устойчивости. Эти показатели определялись на основе предварительно разработанной расчетной схемы 3-D моделирования.*

*Сформулирована цель выполнения расчетов, состоящая в определении запаса динамической устойчивости (против опрокидывания) мобильного колесного шасси в агрегате с технологическим оборудованием. Выполнены соответствующие расчеты на основе технического задания производителя техники. Приведены результаты расчетов и соответствующие выводы.*

*Ключевые слова: пожарный автомобиль, технологическое оборудование, расчетная схема, трехмерная модель, массо-центровочные и геометрические характеристики.*

*The article discusses the issues of justification and selection of a design model based on three-dimensional modeling. A technique and a model are proposed that ensured the necessary degree of parametrization and imitation of various operating modes of the lifting equipment of fire engines. The characteristics are given that allow the method of three-dimensional modeling to quickly calculate the mass-centering characteristics of such equipment.*

*In the Conclusion, possible specific results are formulated when conducting research on the developed methodology using a three-dimensional model in the MCS Adams environment.*

*Key words: fire truck, technological equipment, design scheme, three-dimensional model, mass-centering and geometric characteristics.*

## **Введение**

Мобильный пожарный подъемник – это грузоподъемная машина, состоящая из базового автомобильного шасси, подъемного стрелового оборудования и рабочей платформы. Подъемник предназначен для перемещения рабочего персонала с инструментом и материалами, которые располагаются на рабочей платформе при проведении работ на различных высотах в пределах рабочей зоны.

Технике этого назначения предъявляют самые серьезные требования, а ее разработка и эксплуатация строго регламентированы стандартами, в том числе и межгосударственными [1, 2].

При проектировании подъемных пожарных механизмов, наряду с необходимостью получения высоких эксплуатационных свойств, не менее важное значение имеет обеспечение нормируемых показателей безопасности, особую значимость приобретают прочностные

расчеты, расчеты на грузовую и транспортную устойчивость. Крайне важно правильно рассчитать полезную нагрузку, величину опорного контура при различных вариантах выставления опор (ведь машина должна быть устойчивой и работать даже в стесненных условиях, когда места для размещения мало), учесть метеорологические условия (например, скорость ветра).

От точности проведенных расчетов и грамотных технических решений, заложенных еще на стадии проектирования грузоподъемной техники, зависит жизнеспособность изделия и безопасность людей, которые ее эксплуатируют.

### **Обоснование и выбор параметров расчетной схемы и среды моделирования**

Современные средства автоматизированного проектирования с использованием высокопроизводительных САД- и САЕ-систем требуют пересмотра традиционных способов как постановки задачи оценки указанных свойств, так и алгоритмов решения и интерпретации полученных результатов.

Не смотря на широкие возможности средств САПР, в том числе те, при которых в качестве результатов проектирования выступают конструктивные параметры проектируемого механизма, а в качестве заданных (исходных) условий – значения показателей эксплуатационных свойств, при оценке показателей безопасности наиболее рационально пользоваться традиционной схемой. Такая схема предполагает проведение регламентированных испытательных процедур опытного образца проектируемого механизма. Использование при этом САЕ-систем носит характер т. н. виртуальных испытаний (ВИ) [3, 4].

Наиболее существенное условие валидности методов и средств ВИ для подъемного оборудования спасательных машин – обоснование их соответствия действующим техническим регламентам.

В частности, применительно к подъемному оборудованию на базе автомобильного шасси, важно обеспечить его устойчивость при использовании по назначению. Существующие аналитические способы оценки устойчивости сводятся к определению коэффициента устойчивости  $K_y$ . Поскольку само понятие устойчивости определяется как способность объекта противодействовать опрокидывающим силам

(моментам), то коэффициент устойчивости определяется как отношение удерживающего (стабилизирующего) момента к опрокидывающему моменту (рисунок 1), т. е.

$$K_y = \frac{M_{уд}}{M_{опр}},$$

где  $M_{уд}$  – удерживающий момент;  $M_{опр}$  – опрокидывающий момент.

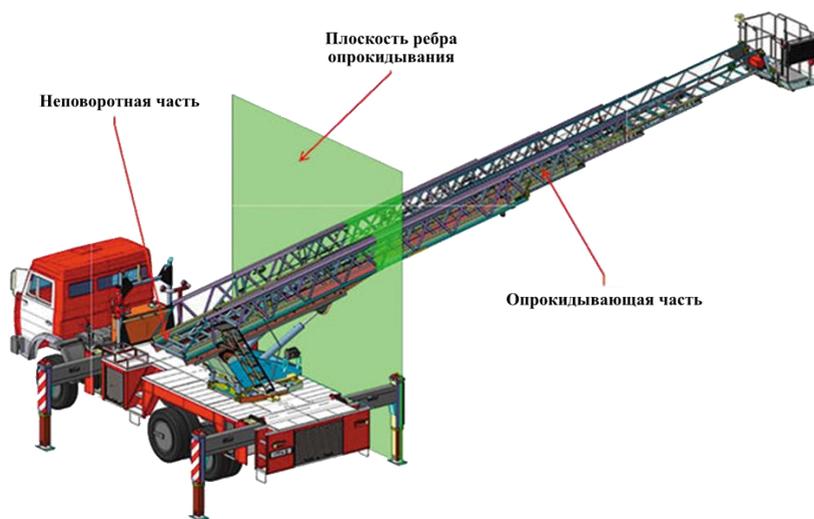


Рисунок 1 – Схема расчетных частей модели автолестницы

Удерживающий момент создается массой неповоротной части  $m_{уд}$  с плечом, равным расстоянию от центра тяжести неповоротной части до плоскости ребра опрокидывания  $r_{уд}$ , а опрокидывающий момент создается помимо массы опрокидывающей части  $m_{опр}$  с плечом  $r_{опр}$  еще и моментом  $M_j$  инерционных сил, возникающих при движении лестницы и моментом  $M_w$  аэродинамической силы при наличии ветра. Тогда коэффициент устойчивости

$$K_y = \frac{M_{уд}}{m_{уд} \cdot r_{уд} + M_j + M_w}.$$

Момент сил инерции определяется как

$$M_j = m_{пов} \cdot j \cdot a,$$

где  $m_{пов}$  – масса поворотной части;  $j$  – угловое ускорение при повороте лестницы;  $a$  – радиус положения центра тяжести лестницы.

Момент, создаваемый силами аэродинамического сопротивления

$$M_w = c_x \cdot F_{\Sigma} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot b,$$

где  $c_x$  – коэффициент аэродинамического сопротивления (для трубчатого сечения  $c_x = 0,47$ );  $F_{\Sigma}$  – площадь проекции машины на вертикальную плоскость, перпендикулярную направлению ветра;  $v$  – скорость ветра;  $b$  – расстояние от опорной поверхности до центра тяжести проекции машины на вертикальную плоскость.

При проведении аналитических расчетов практически невозможно (из-за высокой трудоемкости) определить текущие значения некоторых геометрических параметров, входящих в выражения для определения моментов из-за сложности формы элементов конструкции и их изменения в зависимости от их рабочего положения и режимов движения.

При использовании виртуальных испытаний в CAE-системах задачи определения искоемых геометрических параметров решаются при помощи испытанных алгоритмов машинным способом, а поставленная цель испытаний достигается с помощью путем создания функциональных виртуальных прототипов компонентов оборудования и систем с использованием конструкторских трехмерных моделей на ранних этапах цикла проектирования и выполнения серии виртуальных тестов.

Наиболее часто применяемой в машиностроении средой моделирования механических систем является пакет прикладных программ MSC Adams [2] как инструмент исследования динамики движущихся

частей под действием нагрузок и сил, распределенных по элементам рассчитываемой системы.

Основой для системы уравнений, используемых в MCS Adams, описывающих динамику системы  $n$  твердых тел, находящихся под действием  $m_a$  заданных сил и стесненных  $m$  голономными связями, послужили уравнения в форме Эйлера-Лагранжа с множителями

$$\begin{aligned} \dot{p}_i &= \frac{\partial L}{\partial q_i} + \sum_{k=1}^{m_a} \bar{F}_j \cdot \frac{\partial \bar{F}_k}{\partial q_i} - \sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot \frac{\partial \Phi_j}{\partial q_i}; \\ p_i - \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} &= 0; \\ u_i - \dot{q}_i &= 0; \quad i = 1, \dots, 6n; \\ \Phi_j(\{q_a\}, t) &= 0; \quad j = 1, m; \\ \bar{F}_k - \bar{f}_k(\{q_a\}, \{u_\beta\}, \{\lambda_\gamma\}, t) &= 0; \quad k = \bar{1}, \bar{m}_a. \end{aligned}$$

Для задания движения твердого тела используются инерциальные глобальные координаты его центра масс и углы Эйлера.

Общий вид модели в среде MCS Adams представлены на рисунке 2.

## Заключение

Таким образом, при проведении исследований с помощью трехмерной модели в среде MCS Adams можно достичь следующих практических результатов:

- выполнить виртуальные испытания по предварительной оценке показателей статической и динамической устойчивости;
- провести оценку грузовой устойчивости по заданным в техническом задании параметрам;
- выработать рекомендации по компоновке механизмов и систем автолестницы;
- определить диаграмму рабочей зоны автолестницы по критериям устойчивости.

Примером могут послужить результаты определения величин вертикальных реакций опор автолестницы представлены на рисунке 3.

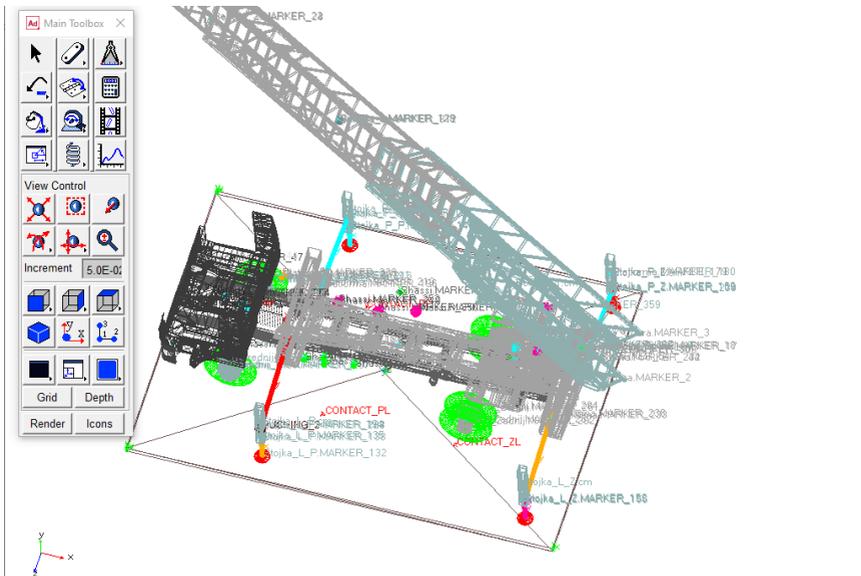


Рисунок 2 – Схема модели в среде MCS Adams

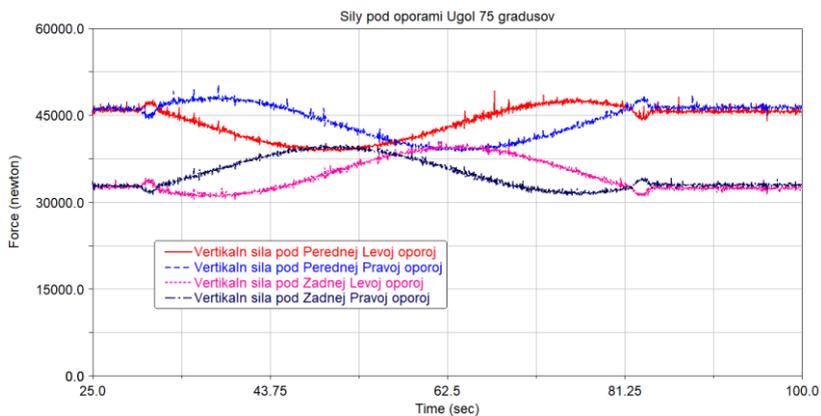


Рисунок 3 – Изменение величин вертикальных реакций опор при повороте платформы (скорость поворота 1 °/с)

Максимальное значение коэффициента устойчивости составило  $K_{y\max} = 2,9$ , а минимальное  $K_{y\min} = 1,6$ .

## Литература

1. Богомолов, М. В. Виртуальные испытания изделий [Электронный ресурс] // Труды МАИ : сетевое научное издание. 2010. – № 38. URL : <http://trudymai.ru/upload/iblock/552/virtualnye-ispytaniya-izdeliy.pdf> (дата обращения : 31.08.2021).
2. Сайт компании HEXAGON [Электронный ресурс] // Adams. The Gold Standard in MultiBody Dynamics Simulation URL : <https://www.mscsoftware.com/product/adams> (дата обращения : 31.08.2021).
3. Дмитриченко, А. С. и др. Компьютерный расчет устойчивости пожарной автолестницы с установленным на ней УКТП «Пурга» // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь, № 2 (10), 2009.
4. Фурунжиев, Р. И., Гурский, Н. Н. Применение математических методов и ЭВМ: Программное моделирование систем. – Минск. : Выш. шк., 1991. – 250 с.
5. Горобцов, А. С. Численное интегрирование уравнений движения систем тел произвольной структуры / Матер. междунар. конф. «Проблемы и перспективы прецизионной механики и управления в машиностроении». – Саратов, 2002. – С. 16–20.
6. Погорелов, В. И. Система и ее жизненный цикл: введение в CALS-технологии: учебное пособие. – СПб : Изд-во БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2010. – 182 с.
7. Lansinger, E. Software support for telematics // Automotive engineering international. – 2002. Oct. – P. 32–34.
8. Pfister, F., Reitze, C, Shmidt, A. Hardware in the Loop – the Technology for Development and Test of Vehicle Control Systems // MDI ADAMS Conference. – Berlin, 1999.

Статья поступила 25.11.2021

**РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ (КРИТЕРИЕВ)  
СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ  
УСТОЙЧИВОСТИ ПОДЪЕМНОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ НА БАЗЕ  
АВТОМОБИЛЬНОГО ШАССИ**

**Бойков В. П.**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф., **Поздняков Н. А.**<sup>1</sup>, ст. преп.,  
**Ковалев П. В.**<sup>2</sup>, гл. конструктор,

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: [trak\\_atf@bntu.by](mailto:trak_atf@bntu.by)

<sup>2</sup>ООО «Пожснаб», г. Борисов, Республика Беларусь,  
e-mail: [tech@pozhsnab.com](mailto:tech@pozhsnab.com)

**CALCULATION OF INDICATORS (CRITERIA)  
OF STATIC AND DYNAMIC STABILITY OF LIFTING  
EQUIPMENT BASED ON AN AUTOMOBILE  
CHASSIS**

**V. Boykov**<sup>1</sup>, Doctor of technical Sciences, Professor,  
**N. Pozdnyakov**<sup>1</sup>, senior lecturer, **P. Kovalev**<sup>2</sup>, chief designer,  
<sup>1</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus,  
e-mail: [trak\\_atf@bntu.by](mailto:trak_atf@bntu.by)

<sup>2</sup>«Pozhsnab» LLC, Borisov, Republic of Belarus,  
e-mail: [tech@pozhsnab.com](mailto:tech@pozhsnab.com)

*В статье рассматриваются вопросы обоснования и выбора расчетной схемы на основе трехмерного моделирования. Предложена методика и модель, обеспечивавшая необходимую степень параметризации и имитацию различных режимов работы подъемного оборудования пожарных машин. Приведены характеристики, позволяющие методом трехмерного моделирования оперативно просчитать массо-центровочные характеристики такого оборудования.*

*В Заключении сформулированы возможные конкретные результаты при проведении исследований по разработанной методике с помощью трехмерной модели в среде MCS Adams.*

*Ключевые слова: пожарный автомобиль, технологическое оборудование, расчетная схема, трехмерная модель, массо-центровочные и геометрические характеристики.*

*The article discusses the issues of justification and selection of a design model based on three-dimensional modeling. A technique and a model are proposed that ensured the necessary degree of parametrization and imitation of various operating modes of the lifting equipment of fire engines. The characteristics are given that allow the method of three-dimensional modeling to quickly calculate the mass-centering characteristics of such equipment.*

*In the Conclusion, possible specific results are formulated when conducting research on the developed methodology using a three-dimensional model in the MCS Adams environment.*

*Key words: fire truck, technological equipment, design scheme, three-dimensional model, mass-centering and geometric characteristics.*

## **Введение**

При оценке конструкции подъемного оборудования на соответствие показателям безопасности необходимо на ранних стадиях проектирования определять показатели статической и динамической устойчивости. Крайне важно правильно рассчитать полезную нагрузку, величину опорного контура при различных вариантах выставления опор (ведь машина должна быть устойчивой и работать даже в стесненных условиях, когда места для размещения мало), учесть метеорологические условия (например, скорость ветра). От точности проведенных расчетов и грамотных технических решений, заложенных еще на стадии проектирования грузоподъемной техники, зависит жизнеспособность изделия и безопасность людей, которые ее эксплуатируют.

Значения этих показателей, кроме конструктивных факторов, зависят от режимов и условий эксплуатации. При этом для определения коэффициента устойчивости практически невозможно (из-за вы-

сокой трудоемкости) определить текущие значения некоторых геометрических параметров, входящих в выражения для определения моментов из-за сложности формы элементов конструкции и их изменения в зависимости от их рабочего положения и режимов движения. Поэтому такие расчеты выполняются с многократной повторностью и проверкой точности. В ряде случаев модель нуждается в доработке по полученным расчетным данным и повторной проверке до достижения необходимой точности.

При использовании виртуальных испытаний в CAE-системах задачи определения искомым геометрических параметров решаются при помощи испытанных алгоритмов машинным способом, а поставленная цель испытаний достигается с помощью путем создания функциональных виртуальных прототипов компонентов оборудования и систем с использованием конструкторских 3D-моделей на ранних этапах цикла проектирования и выполнения серии виртуальных тестов.

## **Анализ исходных данных, выполнение расчетов и оценка результатов**

Целью выполнения расчетов является определение запаса динамической устойчивости (против опрокидывания) мобильного колесного шасси в агрегате с технологическим оборудованием, смонтированном на круговой платформе. При этом предполагалось решить следующие задачи:

- определить существенные конструктивные элементы схемы и значимые массо-геометрические параметры шасси;
- определить технологические режимы и варианты позиционирования объекта;
- определить нагрузочные режимы для различных технологических операций объекта;
- разработать расчетную схему и динамическую модель объекта;
- разработать алгоритма расчетов;
- обосновать расчетные критерии;
- выполнить расчеты в соответствующей среде.

В качестве исходных данных была принята конструктивная схема объекта, представленная на рисунке 1.

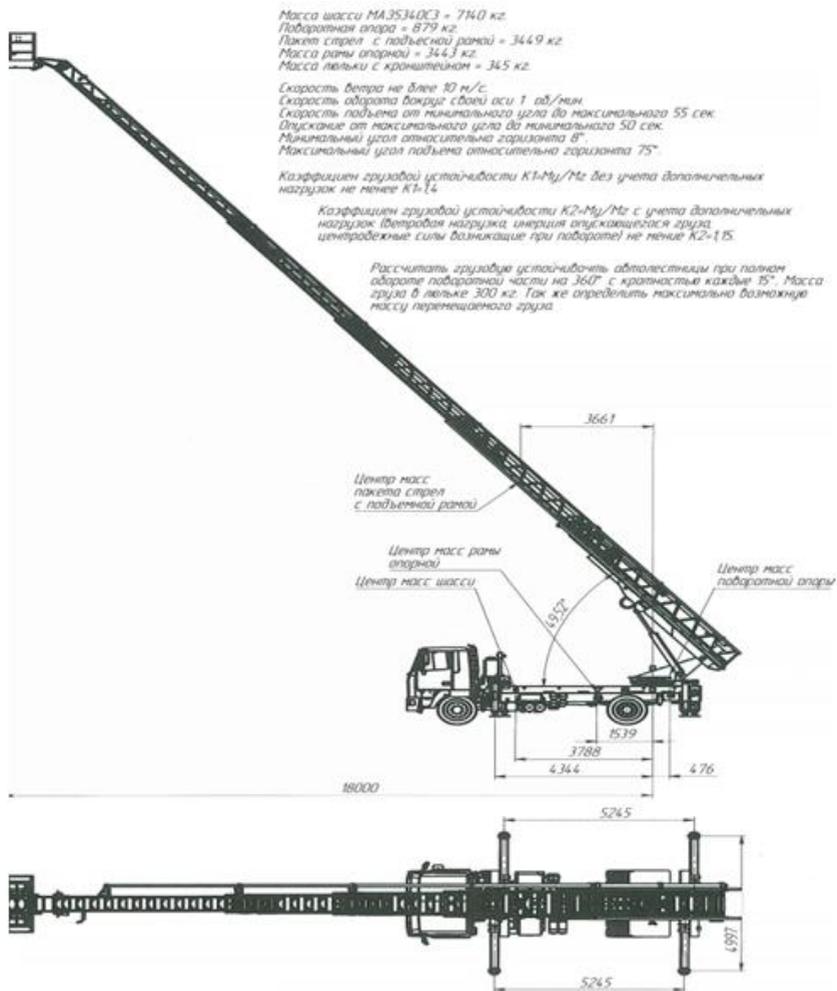


Рисунок 1 – Конструктивная схема шасси.

В качестве массо-геометрических параметров приняты:

- масса шасси – 7140 кг;
- масса поворотной части лестницы – 6010 кг;
- масса люльки – 345 кг;
- масса опорной рамы – 3443 кг;

- продольное расстояние между опорами – 5245 мм;
- поперечное расстояние между опорами – 4995 мм;
- колесная база шасси – 4700 мм;
- скорость ветра – 10 м/с.

В качестве основных критериев приняты:

- величины вертикальных реакций со стороны опорной поверхности на опоры.

Допущения, принятые при проведении расчетов:

- площадка для проведения испытаний имеет нулевые уклоны в продольной и поперечной плоскостях;
- действие силы ветра сосредоточено в центре тяжести лестницы и определено по величинам площади проекции лестницы и коэффициенту аэродинамического сопротивления;
- увеличение и снижение скорости поворота платформы происходит за 2 с.

Схема модели в среде разработки представлена на рисунках 2, 3.

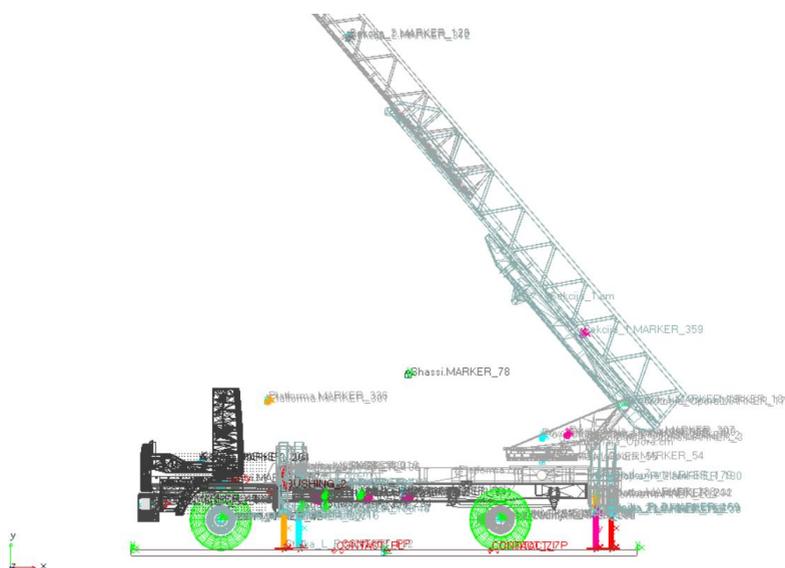


Рисунок 2 – Схема модели в среде разработки MSC Adams

Расчетные исследования проводились при статическом нагружении лестницы при углах ее наклона  $75^\circ$ ,  $48^\circ$  и  $-7^\circ$  при всех возможных поворотных положениях с шагом угла поворота  $2^\circ$  в горизонтальной плоскости.

Вторым этапом выполнялось расчетное определение вертикальных нагрузок при повороте платформы с учетом действия сил инерции поворотной части платформы.

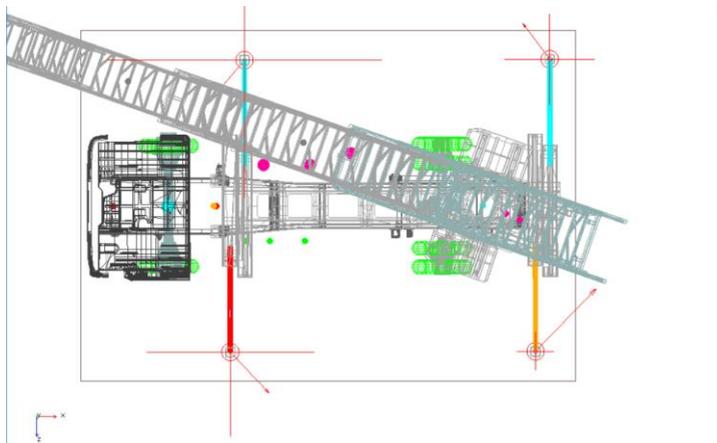


Рисунок 3 – Схема модели в среде разработки MSC Adams

Результаты расчетов динамического нагружения представлены в виде зависимостей исследуемых показателей от времени.

Угол наклона лестницы –  $75^\circ$  (рисунок 4, 5).

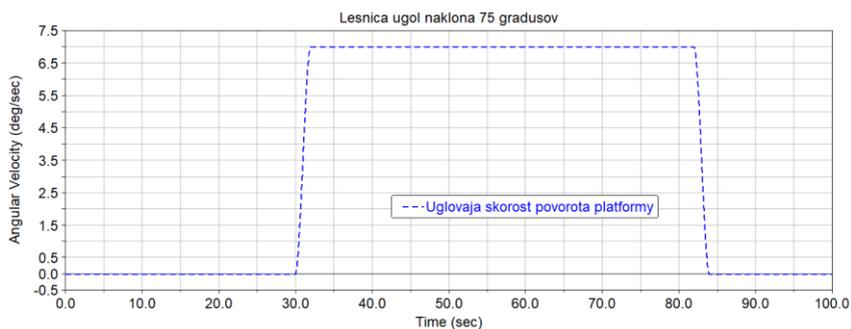


Рисунок 4 – Результаты моделирования при угле наклона лестницы  $75^\circ$

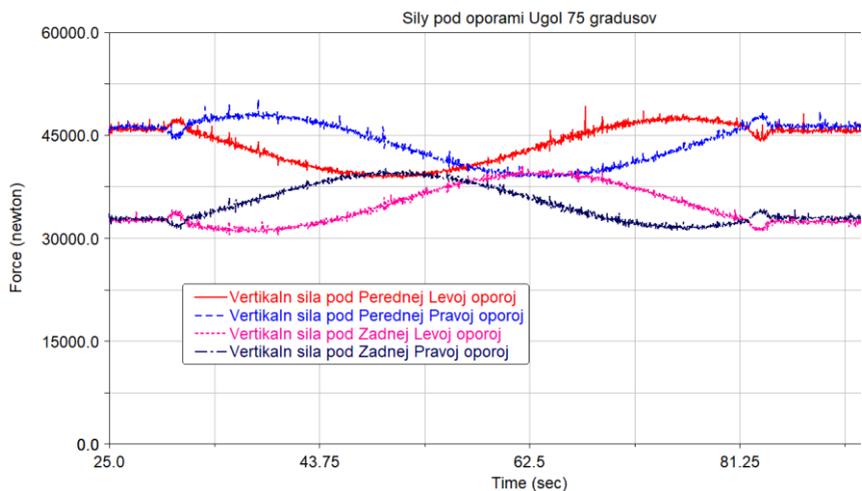


Рисунок 5 – Результаты моделирования при угле наклона лестницы  $75^\circ$

Угол наклона лестницы –  $48^\circ$  (рисунок 6, 7).

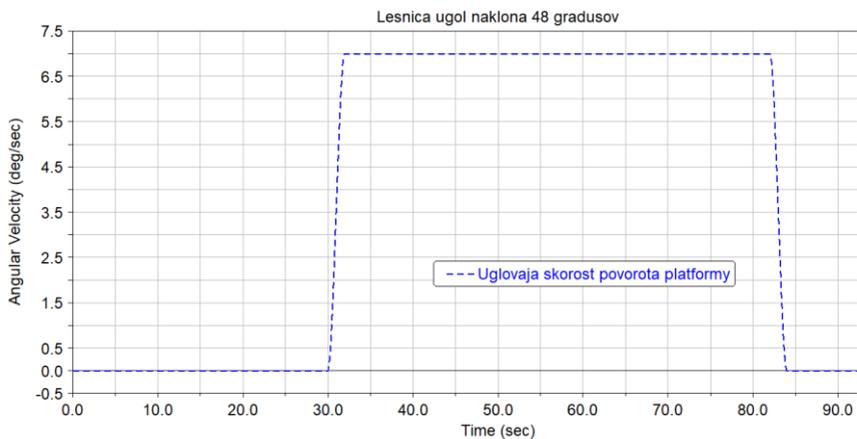


Рисунок 6 – Результаты моделирования при угле наклона лестницы  $48^\circ$

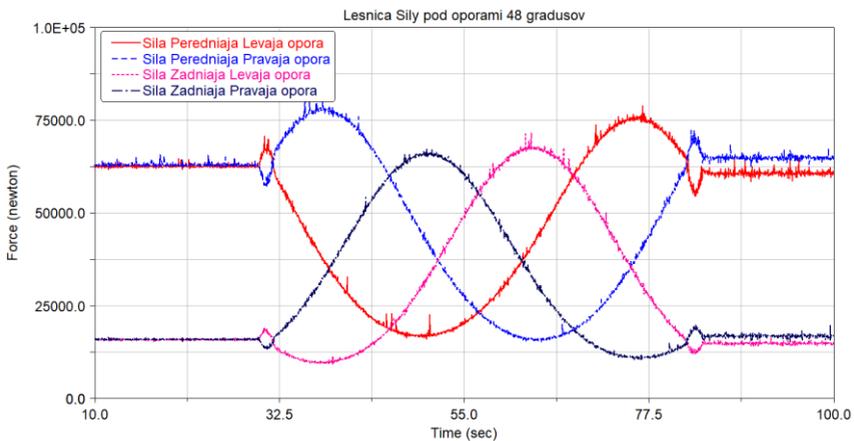


Рисунок 7 – Результаты моделирования при угле наклона лестницы  $48^\circ$

Угол наклона лестницы –  $(-7^\circ)$  (рисунок 8, 9).

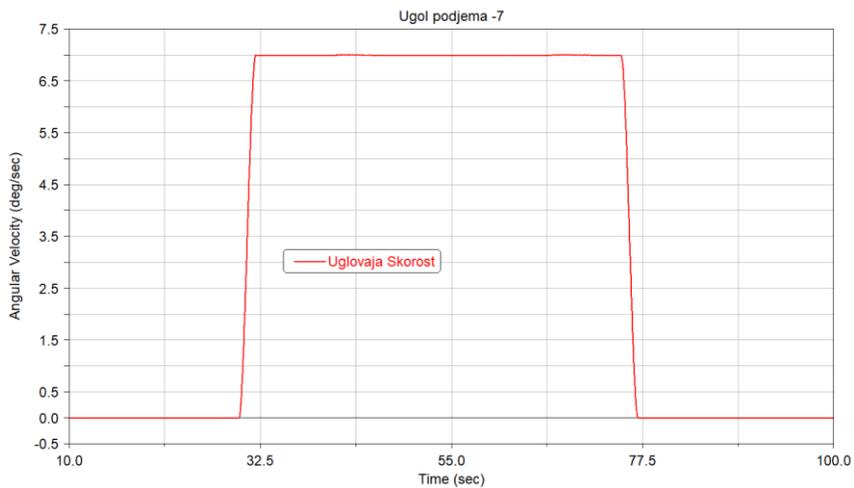


Рисунок 8 – Результаты моделирования при угле наклона лестницы  $-7^\circ$

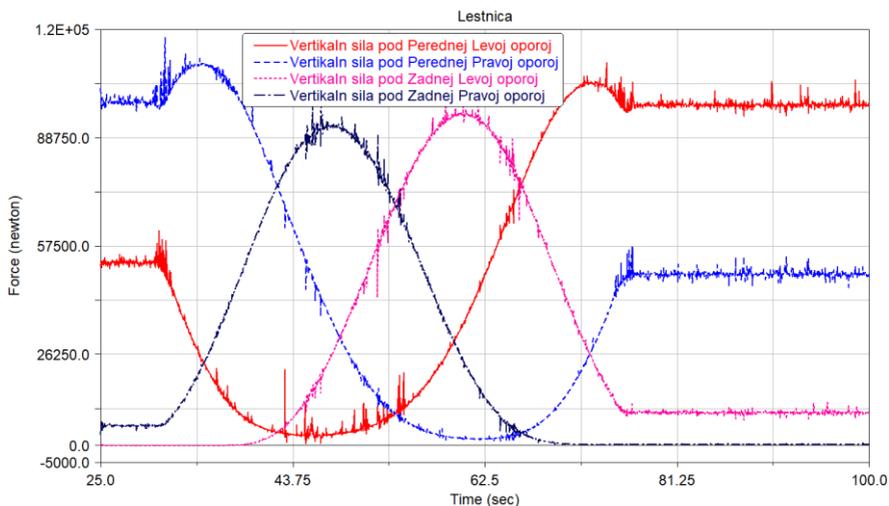


Рисунок 9 – Результаты моделирования при угле наклона лестницы  $-7^\circ$

Сводные данные результатов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчетов

№	Значения	Сила под опорами, Н				Коэффициент устойчивости
		Передняя правая	Передняя левая	Задняя правая	Задняя левая	
Угол наклона $-7$ градусов						
1	минимальные	1939	3117	109	0	1,6
2	максимальные	110310	104630	92431	98596	
Угол наклона $48$ градусов						
3	минимальные	16002	16002	10483	9366	2,1
4	максимальные	78893	78893	67282	71552	
Угол наклона $75$ градусов						
5	минимальные	38683	38788	31189	30532	2,8
6	максимальные	50357	49288	40181	40498	

## Заключение

Анализ результатов расчетов показывает, что при статическом нагружении при угле наклона лестницы  $-7^\circ$  происходит отрыв задней левой стойки в положении лестницы справа у кабины. В остальных положениях платформа сохраняет устойчивость.

При заданной скорости поворота платформы силы инерции не оказывают существенного влияния на величины вертикальных нагрузок на стойки. Так же незначительное влияние оказывает ветер с заданной скоростью 10 м/с.

## Литература

1. Мелентьев, В. С. ADAMS/View, ADAMS/PostProcessor: Краткий справочник пользователя : учеб. пособие / В. С. Мелентьев, А. С. Гвоздев. – Самара : Изд-во Самар, гос. аэрокосм, ун-та, 2006. – 106 с.
2. Колесникович, А. Н. Виртуальные испытания транспортных средств на статическую устойчивость / А. Н. Колесникович, В. Б. Альгин, С. В. Харитончик // Повышение конкурентоспособности автотранспортных средств : сб. науч. тр. 2004. – С. 229–233.
3. Норенков, И. П. Основы автоматизированного проектирования. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 336 с.
4. Левковец, Л. Б., Тарасенков, П. В., Сокурченко, Ю. А. Autodesk Inventor. Базовый курс на примерах. – СПб : БХВ Петербург, 2008. – 400 с.
5. Погорелов, В. И. Система и ее жизненный цикл: введение в CALS-технологии: Учебное пособие. – СПб : Изд-во БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2010. – 182 с.
6. Сережкин В.Н. О законах распределения временных характеристик оперативного реагирования пожарных подразделений / Пожарная аварийно-спасательная техника и оборудование для ликвидации чрезвычайных ситуаций : сб. материалов V международной заочной научно-практической конференции – Минск : УГЗ, 2019. – 100 с.
7. ГОСТ Р 52284-2004. Автолестницы пожарные. Общие технические требования. Методы испытаний.
8. Моисеев, Ю. Н., Терехнев, В. В. Пожарная техника. Книга 2. Мобильные средства пожаротушения. Екатеринбург : Калан, 2015.

Статья поступила 25.11.2021

## **ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНОГО МЕТОДА В ДИАГНОСТИРОВАНИИ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ**

*Семенов И. Н.,*

Брестский государственный технический университет,  
г. Брест, Республика Беларусь, e-mail: *mea@bstu.by*

## **APPLICATION OF THE IMPULSE METHOD IN DIAGNOSING MOTOR CARS**

*I. Semenov,*

Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus,  
e-mail: *mea@bstu.by*

*Рассмотрены вопросы диагностирования гидрофицированных трансмиссий современных легковых автомобилей. Предложены диагностические параметры и критерии качества оценки технического состояния современных трансмиссий легковых автомобилей. Отмечено, что применение импульсного метода в диагностировании гидрофицированных трансмиссий позволяет осуществить своевременную локализацию неисправностей элементов гидравлического блока управления коробкой передач, а также регулировать величину давления рабочей жидкости с целью уменьшения нагрузок на детали трансмиссии и для увеличения ресурса и повышения плавности хода.*

*Ключевые слова: легковой автомобиль, гидрофицированная трансмиссия, диагностика, диагностический параметр, техническое состояние, импульсный метод*

*The issues of diagnostics of hydraulic transmissions of modern passenger cars are considered. Diagnostic parameters and quality criteria for assessing the technical condition of modern transmissions of motor cars are proposed. It is noted that the use of the impulse method in diagnosing hydraulic transmissions allows timely localization of faults in the elements*

*of the hydraulic control unit for the gearbox, as well as regulating the pressure of the working fluid in order to reduce the loads on the transmission parts and to increase the resource and improve the smoothness of the ride.*

*Keywords: motor cars, hydraulic transmission, diagnostics, diagnostic parameter, technical condition, impulse method.*

## **Введение**

Современные легковые автомобили (ЛА) широко оснащаются новейшими бортовыми электронными системами управления, контроля и диагностики. Легковой автомобиль представляет собой сложную иерархическую систему взаимодействующих друг с другом элементов (механизмов и деталей). Движение ЛА происходит в очень разнообразных и нередко сложных условиях. Эти условия преимущественно определяются параметрами дорожных, эксплуатационно-технических, природно-климатических характеристик, маршрутами и фазами движения, режимами нагружения трансмиссии и всевозможными опасными и нештатными ситуациями [1].

Функциональные свойства ЛА как технического объекта определяют степень его приспособленности к эксплуатации в качестве транспортного средства. К ним относятся: тягово-скоростные свойства, тормозные свойства, топливная экономичность, устойчивость, управляемость, маневренность, плавность хода, проходимость. Тягово-скоростные свойства ЛА характеризуют его способность перевозить пассажиров с высокой средней скоростью и производительностью. Тормозные свойства автомобиля определяют его способность быстро снижать скорость при одновременном исключении заносов с целью уменьшения вероятности дорожно-транспортных происшествий и повышения безопасных скоростей движения. Топливная экономичность характеризует эффективность использования энергии топлива при выполнении работы по перевозке пассажиров.

Важнейшим качеством ЛА является его надежность. К свойствам надежности относятся безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость. Безотказность – свойство ЛА непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки. Признаком нарушения работоспособности (отказа) является необходимость текущего ремонта. Долговечность –

свойство автомобиля сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Ремонтпригодность – свойство, определяющее приспособленность автомобиля к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов или повреждений и поддержанию или восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонтов. Сохраняемость – свойство ЛА сохранять безотказность, долговечность и ремонтпригодность после хранения или транспортирования.

Эффективное функционирование ЛА в процессе перевозки пассажиров зависит от правильно сформированных тягово-скоростных и топливно-экономических показателей автотранспортного средства. При этом важным является обеспечение его безопасности и надежности. В связи с этим необходимо осуществлять дифференцированный их учет при синтезе алгоритмов управления и диагностики в процессе комплексных исследований их влияния на показатели эффективности и качества, важное значение при этом имеет научно-техническое прогнозирование на стадии проектирования перспективных систем управления и диагностики [1, 2].

Трансмиссии современных легковых автомобилей в основном являются гидрофицированными. Их основными частями служат механические и гидромеханические передачи, которые работают в сложных условиях. Элементы (сборочные единицы и детали) этих механизмов, представляющие собой вальные и планетарные коробки передач, постоянно подвергаются знакопеременным нагрузкам. Для обеспечения безопасного движения автомобиля и его работоспособности в целом необходимо непрерывно в режиме реального времени отслеживать техническое состояние этих сложных дорогостоящих передач.

Для оценки технического состояния гидрофицированных трансмиссий (ГТ) ЛА, своевременной постановки технического диагноза, оперативного выявления опасных отказов и скрытых дефектов, предотвращения появления неисправностей и прогнозирования остаточного ресурса, необходимо использовать новые информационные технологии и прогрессивные методы, основанные на комплексных экспериментальных и теоретических исследованиях и новых способах обработки результатов [4, 5].

Применению бортовых систем не только на ГТ ЛА, но и на многих автотранспортных средствах (АТС) в целом, сопутствует ряд проблем. Основная из них – это проблема постоянных отказов в трансмиссиях. Существующие подходы к решению проблемы *неэффективны и пассивны*, т. к. приходится исключать АТС из рабочего цикла в связи с аварийными ситуациями или необходимостью проведения технических обслуживаний и ремонтов, часто преждевременных и необоснованных ни технически, ни экономически [5, 6].

## **1. Основы диагностирования трансмиссий легковых автомобилей**

Трансмиссии легковых автомобилей с электронным управлением так же, как и обычные неавтоматизированные трансмиссии – механические и гидромеханические коробки передач – используют гидравлическую систему с рабочей жидкостью для включения муфт и тормозных лент, при этом каждый гидравлический контур управляется электромагнитным (реже – гидравлическим) клапаном.

Под *гидрофицированной трансмиссией* автотранспортного средства будем понимать такую автоматизированную трансмиссию, которая оснащена электронно-гидравлической системой управления, контроля и диагностики, при этом в ее состав входят гидромеханические или гидродинамические элементы, а также технические средства гидроавтоматики и различные гидроаппараты. Гидрофицированные трансмиссии современных автомобилей, как правило, являются автоматизированными или легко поддаются автоматизации на основе средств микроэлектроники и бортовой диагностики.

Многие современные ЛА имеют автоматические коробки переключения передач (АКП). Эти АКП являются принадлежностью гидрофицированных трансмиссий (ГТ). Неправильное или несанкционированное управление гидравлическими параметрами рабочего тела (гидравлической жидкости) является основной причиной выхода из строя и уменьшения срока службы АКП ЛА.

В процессе эксплуатации может произойти еще одно явление с негативными последствиями – это деформация рабочей жидкости при ударе (сжатие жидкости). Это можно расценивать как реакцию на гидравлические возмущения.

В момент удара, субъективно воспринимаемого водителем, происходит резкое наполнение рабочей жидкостью подпоршневого пространства, и увеличение давления в тормозах планетарного ряда. Все это может снизить ресурс трансмиссии. Для парирования последствий удара необходим *специальный способ*.

Суть разработанного автором способа, который реализован в импульсном методе, сводится к следующему. Для повышения ресурса гидрофицированной трансмиссии ЛА необходимо увеличить плавность хода и уменьшить ударные нагрузки, воздействующие на нее. Электронный блок управления АКП не реагирует на ударные нагрузки, а только воспринимает пробуксовки в пакетах фрикционных муфт или лентах, соответственно повышается давление до момента исключения пробуксовки. Когда давление становится слишком высоким, то появляется удар (толчок), возникающий как следствие резкого возрастания давления жидкости, вызванное также и мгновенным изменением скорости ее течения в магистрали. Такой удар воспринимается как мощный толчок, что негативно сказывается на деталях всей трансмиссии, резко снижая надежность [7–8].

## **2. Диагностирование легковых автомобилей на основе импульсного метода**

Данный раздел статьи посвящен разработке эффективного метода осуществления оперативной оценки текущего состояния ГТ ЛА. Таким современным методом, использующим новые технологии и который может быть успешно реализован в автоматизированных гидрофицированных трансмиссиях, является импульсный метод [9].

С помощью *импульсного метода* можно определить величину толчков, воздействующих на детали трансмиссии, и за счет *правильно выстроенных команд* исполнительных модулей системы управления / диагностирования по заложенным алгоритмам можно снизить давление вплоть до пробуксовки муфт. После этого электронная система зафиксирует факт пробуксовки и далее повысит давление до требуемого уровня. Таким образом, обеспечивает плавность процессов включения элементов и повышается ресурс ГТ.

Для восприятия толчков можно дополнительно на карте коробки передач установить датчик детонации.

Рассмотрим, какие же диагностические параметры целесообразно использовать для эффективной диагностики ГТ ЛА. Предложим также критерии качества оценки технического состояния ГТ.

В качестве параметров диагностирования ГТ целесообразно использовать *наиболее информационные*, а также те из них, которые легко могут быть зафиксированы и определены средствами бортовой автомобильной микроэлектроники. Такими параметрами являются:

– амплитуды пульсации давлений рабочей жидкости в соответствующих каналах  $A_{pi}$  (рисунок 1);

– частоты вращения входного  $n_1$  и выходного  $n_2$  валов АКП;

– величины текущих давлений  $p_i$ ;

– коэффициент пульсации давления  $K_{II} = 100 \cdot \frac{P_{\max} - P_{\min}}{2 \cdot p_{cp}}$ ;

– длительность переходного процесса  $t_{п.п}$  в системе гидропривода управления.

В качестве дополнительных параметров можно использовать напряжение  $U_{эк}$  и силу тока  $I_{эк}$  на обмотках электромагнитных клапанов.

Для анализа степени износа элементов муфт можно оценивать величину изнашивания  $\Delta_n$  дисков трения ФМ.

Для оценки работоспособности ГТ ЛА инструментальными методами можно использовать ряд показателей, среди которых коэффициент вариации  $V_s = \frac{\sigma_s}{\bar{s}}$  ( $\sigma_s$  и  $\bar{s}$  – среднее квадратическое отклонение и математическое ожидание диагностического параметра).

Характеристики пульсаций гидравлических и электрических диагностических параметров могут иметь разный вид, требующий специального математического описания (рисунок 2).

Характеристики пульсаций гидравлических и электрических диагностических параметров могут иметь разный вид, требующий специального математического описания (рисунок 2).

В качестве критериев оценки технического состояния ГТ ЛА как объекта диагностики нужно выбирать те из них, которые могут указывать на возможность приближения состояния объекта к предельному состоянию, при котором он не способен выполнять свои функции либо выполнение своего функционального назначения экономически нецелесообразно.

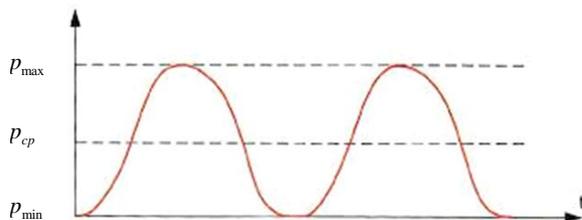


Рисунок 1 – Максимальное, среднее и минимальное значения давления

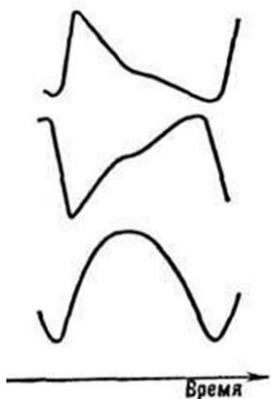


Рисунок 2 – Характер пульсаций диагностического параметра гидравлической или электрической природы

Таковыми критериями для автотранспортных средств, имеющими гидрофицированные трансмиссии, могут служить КПД трансмиссии, температура коробки передач, производительность выполнения транспортной работы и др.

В электронных бортовых системах ГТ ЛА в алгоритмах управления используются два основных параметра: скорость движения автомобиля и нагрузка на двигатель. Эти параметры определяются электронными датчиками. Основными из них являются датчики: частоты вращения на входе коробки передач (скорость вращения турбинного колеса гидротрансформатора для ГТ с ГМП), частоты вращения на выходе коробки передач (скорость выходного вала), положения колленчатого вала, температуры рабочей жидкости, положение рычага

селектора и переключателя режима работы АКП, массового расхода воздуха или абсолютного давления во впускном коллекторе и положение педали акселератора. Кроме того, блок управления АКП получает дополнительную информацию от блока управления двигателем и других электронных систем автомобиля (например, от системы динамического контроля устойчивости автомобиля). Это позволяет более точно, чем в обычной АКП, определять моменты переключений передач и блокировки гидротрансформатора для коробок с ГМП. Программа переключения передач по характеру изменения скорости при данной нагрузке на двигатель может легко вычислить силу сопротивления движению автомобиля и ввести соответствующие поправки в алгоритм переключения, например, попозже включать повышенные передачи на полностью загруженном автомобиле или невысоком ускорении разгона.

В то же время большой проблемой современных ГТ ЛА является, тем не менее, два негативных фактора. Это снижение надежности управления трансмиссией и то, что заложенные в электронный блок алгоритмы управления искажаются и оказываются недостоверными ввиду проявляющихся неисправностей гидропривода ГТ. Неисправности в работе электромагнитных клапанов-регуляторов, как механические, так и электрические, являются причиной неправильного управления гидравлическими параметрами рабочего тела и впоследствии приводящие к отказам и снижению надежности гидрофицированных трансмиссий.

Методика повышения точности информации о техническом состоянии электромагнитных клапанов-регуляторов АКП ГТ ЛА, полученных при импульсном методе диагностирования, подробно изложена в [8].

Важным этапом исследований является также установление закономерностей изменения параметров рабочего процесса ГТ (амплитуд пульсации давлений, расходов рабочей жидкости, длительности переходных процессов в системе гидропривода управления фрикционными), а также получение статистических характеристик процесса пульсации [10, 11].

## **Вывод**

Эффективное и надежное функционирование легковых автомобилей может быть обеспечено лишь путем применения самых совершенных принципов, методов и технических средств определения их технического состояния, т. е. процессов диагностирования. Применение импульсного метода в диагностировании гидрофицированных трансмиссий позволяет осуществить своевременную локализацию неисправностей элементов гидравлического блока управления АКП, а также корректировать величину давления, подаваемого в тормозные муфты и к лентам, с целью уменьшения нагрузок на детали трансмиссии и для увеличения ресурса и повышения плавности хода.

## **Литература**

1. Рынкевич, С. А. Управление и диагностика мобильных машин на основе бортовой микроэлектроники: этапы и перспективы / С. А. Рынкевич // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2015. – № 3 (44). – С. 57–67.
2. Рынкевич, С. А. Автоматизация трансмиссий гидрофицированных мобильных машин / С. А. Рынкевич // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2015. – № 4 (45). – С. 68–78.
3. Рынкевич, С. А. Проектирование, эксплуатация и диагностика мобильных машин / С. А. Рынкевич, В. В. Кутузов. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2016. – 223 с.
4. Рынкевич, С. А. Основы управления и диагностирования автотранспортных средств с применением бортовой микроэлектроники / С. А. Рынкевич // Вестник Курганского государственного университета. Серия «Технические науки». Выпуск 12. – 2017. – № 2 (45) – С. 77–84.
5. Рынкевич, С. А. Методология проектирования подвижных объектов / С. А. Рынкевич // Сб. науч. трудов БНТУ «Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии» : Минск, 2018. – С. 130–153.
6. Рынкевич, С. А. Автоматизация диагностирования механических и гидромеханических трансмиссий / С. А. Рынкевич // Автотракторостроение и автомобильный транспорт : сборник научных

трудов в 2-х томах / Белорусский национальный технический университет; редкол. : отв. ред. Д. В. Капский [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – Т. 1. – С. 46–50.

7. Семёнов, И. Н. Повышение надежности гидрофицированных трансмиссий легковых автомобилей / И. Н. Семёнов, С. А. Рынкевич // Автомобиле- и тракторостроение : материалы Международной научно-практической конференции, Минск, 24–27 мая 2019 г. / Белорусский национальный технический университет; редкол. : отв. ред. Д. В. Капский [и др.]. – Минск : БНТУ, 2019. – Т. 1. – С. 48–52.

8. Семёнов, И. Н. Методика повышения надежности гидрофицированных трансмиссий легковых автомобилей : Автотракторостроение и автомобильный транспорт : сборник научных трудов : в 2 т. / отв. ред. Д. В. Капский. – Минск : БНТУ, 2020. Т. 1. – С. 42–45.

9. Семёнов, И. Н. Импульсный метод диагностирования гидрофицированных трансмиссий легковых автомобилей // Вестник БрГТУ. – 2019. – № 4 (117) : Машиностроение. – С. 94–96.

10. Рынкевич, С. А. Параметры управления фрикционными муфтами ГМП и их влияние на износно-ресурсные характеристики и тепловую нагруженность фрикционов / С. А. Рынкевич // Автомобильная промышленность. – 2009. – № 12. – С. 15–18.

11. Рынкевич, С. А. Результаты экспериментальных исследований закономерностей изменения ресурса автомобильных ГМП // Автомобильная промышленность. – 2010. – № 1. – С. 20–23.

Статья поступила 25.11.2021

## ГРАДИЕНТНЫЙ СПОСОБ РЕГУЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ СИСТЕМ АБС ДЛЯ ДВУХКОЛЕСНЫХ ОДНОКОЛЕЙНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

*Михальцевич Н. Р.*, инженер-механик,  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь,  
e-mail: *mikhaltsevichnr@bntu.by*

### PRE-EXTREME ALGORITHM ABS FOR TWO-WHEELED VEHICLE

*M. Mikhaltsevich*, mechanical engineer,  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus,  
e-mail: *mikhaltsevichnr@bntu.by*

*В статье рассмотрен градиентный способ регулирования работы антиблокировочной системы (АБС). Рассматривается возможность применения данного способа регулирования для АБС двухколесной одноколейной техники. Представлено математическое описание градиентного способа регулирования. Разработана математическая модель данного способа работы антиблокировочной системы при криволинейном движении мотоцикла. Данная модель разработана с учетом возможности получения необходимых данных для работы АБС без разработки новой сенсорной базы, что в значительной степени упростит введение в эксплуатацию таких систем, что в свою очередь позволит повысить уровень активной безопасности данного вида транспортных средств.*

*Ключевые слова: Мотоцикл, АБС, градиентный способ регулирования, математическая модель, тормозная система.*

*The article introduced pre-extreme algorithm for operation ABS. The possibility of using this method for ABS of TWV is being considered. The mathematical description of the pre-extreme control method is presented.*

*Mathematical model has been developed for this method of anti-lock braking system operation during curvilinear motorcycle driving. This model was developed taking into account the possibility of obtaining the necessary data for the operation of the ABS without developing a new sensors base. This decision will accelerate the development of such ABS and will increase level of active safety for TWV.*

*Keywords: motorcycle, ABS, pre-extreme algorithm, mathematical model, braking system.*

## **Введение**

Управление торможением двухколесных машин описывается рядом положений теории движения. Объектом регулирования любой системы активной безопасности движения двухколесной машины, является колесо. Для создания эффективной системы активной безопасности необходимо учитывать все факторы, возникающие при качении колеса. При проектировании данных систем необходимо рассматривать тормозную динамику транспортного средства. В силу влияния ряда конструктивных параметров на процесс торможения каждого типа транспортного средства, следует учитывать различные конструктивные особенности и их влияние на процесс торможения. Анализ движения транспортного средства позволяет учитывать степень влияния тех или иных факторов на его устойчивость при торможении. Одним из наиболее значимых положений теории движения является процесс криволинейного движения. При создании алгоритма управления антиблокировочной тормозной системой недостаточно рассматривать процесс качения колеса. Необходимо проводить совместный анализ процесса качения и динамики движения.

По условию безопасного движения необходимо, чтобы тормозная система мотоцикла обеспечивала ему кратчайший тормозной путь. Одним из основных этапов при расчете тормозного пути является определение величины среднего и максимального замедлений при торможении. Теоретически, при высоких значениях коэффициента сцепления между шиной и дорогой возможны весьма высокие значения замедления. Однако, при больших тормозных усилиях возникает блокировка колес, которая ухудшает поперечную устойчивость мотоцикла и представляет опасность потери его устойчивости и управляемости.

Максимальное замедление при торможении достигается, когда коэффициент проскальзывания составляет порядка 14 %. Для достижения этого необходимо точно задавать величину тормозного усилия. Теоретически это сделать нетрудно для заданного значения замедления. Практически, в условиях быстрого торможения, необходима точная дозировка тормозного усилия для достижения, требуемого (в данный момент) оптимального значения замедления. Эффективным решением этой проблемы является установка на мотоцикл антиблокировочной системы тормозов (АБС). Вместе с тем, поскольку мотоцикл является одноколейным транспортным средством, к АБС должны предъявляться иные требования, по сравнению с АБС, установленной на автомобиль. Главное отличие заключается в том, что для автомобиля допускается блокировка передних колес, которая не приводит к потере его устойчивости. Для мотоцикла блокировка переднего колеса недопустима, т. к. она приводит к потере устойчивости движения и управляемости, и, как следствие падению мотоцикла. В связи с этим для эффективной и безопасной работы систем АБС на двухколесной технике, предлагается использовать градиентный (до-экстремальный) способ регулирования в антиблокировочных системах. Это позволит максимально эффективно и безопасно эксплуатировать данный вид транспорта с учетом вышеописанных особенностей.

### **Градиентный способ регулирования работы антиблокировочных систем**

Для двухколесной техники наиболее оптимальным является использование градиентного метода регулирования. Он базируется на отслеживании оптимальной по сцеплению области работы колеса одновременно по направлению изменения коэффициента сцепления  $\mu$  и коэффициента относительного проскальзывания шины  $S$ . Параметром регулирования при этом является производная от этих параметров  $d\mu/ds$ . Техническая реализация данного подхода регулирования стала возможна после внедрения в автомобилестроении новых микроэлектронных и мехатронных технологий для сенсорной и исполнительской части АБС.

Основное преимущество градиентного регулирования состоит в том, что оно позволяет обеспечить устойчивую работу колеса в доэкстремальной области  $\mu$ - $s$ -кривой. Выбор граничных условий в этой области для определения порогов срабатывания АБС может обеспечить максимально возможную эффективность торможения, управляемость и устойчивость движения, а также минимальные энергетические потери в колесе.

Одним из граничных условий является равенство

$$\frac{d\mu}{ds} = 0;$$

что соответствует максимуму  $\mu$ - $s$ -кривой. Необходимо, чтобы порог срабатывания АБС на очередное затормаживание после цикла сброса давления не выходил за эти границы.

За точкой, соответствующей максимальному коэффициенту сцепления шины  $\mu_{max}$ , регулирование должно происходить, исходя из показателей безопасности движения и износа шин, т. к. мощность торможения в данной ситуации начинает все больше перераспределяться с тормозного механизма на контакт колеса с дорогой.

Разделив числитель и знаменатель дроби на  $dt$ , получаем  $d\mu / dt = 0$ , а  $ds / dt$ , а любое число. Таким образом, отслеживание  $\mu_{max}$  обеспечивает автоматическую адаптацию работы АБС к изменению экстремума по оси  $S$ .

Порог срабатывания АБС для понижения давления должен находиться в доэкстремальной области  $\mu$ - $s$ -кривой. Доэкстремальный алгоритм описывается следующим образом. Сигнал на растормаживание АБС подается при выполнении условий:

$$\begin{aligned} dF / ds > 0; \\ \left| \left( \frac{dF_{\mu}}{ds} \right)_i - \left( \frac{dF_{\mu}}{ds} \right)_{i-1} \right| \leq \chi_1. \end{aligned}$$

где  $\chi_1$  – регулировочное отклонение для определения начала понижения давления.

Достижение системой значения  $\chi_1$  свидетельствует об окончании линейного участка  $\mu$ - $s$ -кривой и приближении к экстремуму.

В зависимости от инерционности системы, оттормаживание может начинаться как в доэкстремальной, так и в постэкстремальной области  $\mu$ - $s$ -кривой, однако, в любом случае будет происходить уменьшение проскальзывания  $S$ . При этом антиблокировочной системой контролируется выполнение соотношений:

$$dF / ds < 0;$$

$$\left| \left( \frac{dF_\mu}{ds} \right)_i - \left( \frac{dF_\mu}{ds} \right)_{i-1} \right| \leq \chi_2.$$

где  $\chi_2$  –регулируемое отклонение для повышения давления, свидетельствующее о предельно допустимом отклонении от экстремума.

Далее описанные процессы повторяются до прекращения критической ситуации. Идеальные, предельные циклы регулирования, когда система получает сигнал на очередное торможение в точке экстремума, представлены на рисунке 1 (запаздывание срабатывания исполнительных механизмов равно «0»).

Точка «1» – точка начала регулирования, нижняя граница доэкстремальной области; точка «2» – точка завершения регулирования, экстремум по силе сцепления колеса с дорогой.

Информация об изменении параметра  $dF_\mu / ds$  может быть получена от датчика окружной силы или тормозного момента, или контролироваться аппаратно, датчиками давления в тормозном приводе и угловой скорости колеса. Аналитически выражение зависимости производной  $dF_\mu / ds$  от момента, развиваемого тормозным механизмом, и замедления может быть получено дифференцированием по  $ds$  уравнения:

$$m \cdot \frac{dV_a}{dt} = F_\mu + (1-s) \cdot \left( \frac{M_{br}}{r_d} - \frac{J}{r_d} \cdot \frac{d\omega_k}{dt} - F_\mu \right),$$

где  $m$  – масса приходящаяся на колесо,  $V_a$  – скорость движения,  $r_d$  – динамический радиус колеса,  $J$  – момент инерции колеса.

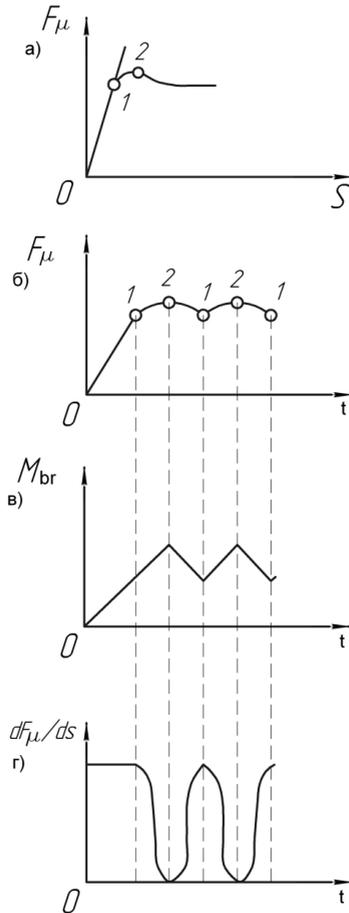


Рисунок 1 – Идеальные циклы работы АБС

с градиентным регулированием АБС ( $\chi_1 = \chi_2$ ).

- а) график изменения силы сцепления  $F_{\mu}$  от коэффициента проскальзывания  $S$ ;  
 б) график изменения силы сцепления  $F_{\mu}$  от времени; в) график изменения тормозного момента  $M_{br}$  от времени; г) график изменения  $dF_{\mu} / ds$  от времени

$$\frac{dF_{\mu}}{ds} = m \cdot \frac{dj}{ds} + \frac{1}{r_d} \left( \left( 1 - \frac{1}{s} \right) \cdot \left( \frac{dM_{br}}{ds} - J \cdot \frac{d\varepsilon}{ds} \right) - \frac{1}{s^2} \cdot (M_{br} - J \cdot \varepsilon) \right).$$

Метод регулирования по градиенту в доэкстремальной области  $\mu$ - $s$ -зависимости требует, чтобы АБС имела высокотехнологичное исполнение. Вместе с тем данная АБС позволяет ТС сохранять устойчивость и управляемость, поскольку позволяет контролировать влияние боковых сил.

### Математическая модель градиентного способа регулирования работы АБС двухколесного транспортного средства при криволинейном движении

Для данного режима торможения схема двухколесного транспортного средства представлена на рисунке 2.

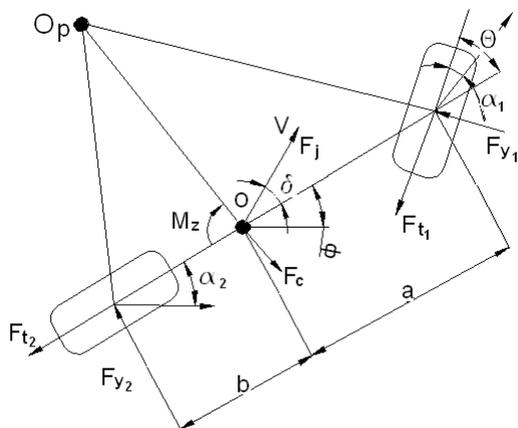


Рисунок 2 – Модель одноколейного транспортного средства при криволинейном движении (при торможении)

$O_p$  – центр поворота;  $O$  – центр масс;  $F_j$  – инерционная сила;  $F_c$  – центробежная сила;  $F_t$  – тормозная сила;  $F_y$  – реакции дороги в поперечном направлении;  $M_z$  – момент инерции;  $\theta$  – угол поворота управляемых колес;  $\phi$  – угол действия

При этом, для упрощения расчетов не учитываются аэродинамические силы, действующие на мотоцикл в боковом и фронтальном направлениях, ввиду их незначительного влияния на торможение транспортного средства.

Данная схема описывается следующими уравнениями:

$$-F_{\tau 1} \cdot \cos \theta - F_{y 1} \cdot \sin \theta - F_{\tau 2} + F_c \cdot \sin \delta + F_j \cdot \cos \delta = 0 ;$$

$$-F_{\tau 1} \cdot \sin \theta + F_{y 1} \cdot \cos \theta + F_{y 2} - F_c \cdot \cos \delta + F_j \cdot \sin \delta = 0 ;$$

$$M_z + F_{y 2} \cdot b - F_{y 1} \cdot \cos \theta \cdot a - F_{\tau 1} \cdot \sin \theta \cdot a = 0 .$$

Используя данные уравнения, определим значение  $F_{\tau 1}$ :

$$F_{\tau 1} = \frac{M_z + F_{y 2} \cdot b - F_{y 1} \cdot \cos \theta \cdot a}{a \cdot \sin \theta} .$$

Момент инерции  $M_z$ , определяем по формуле,

$$M_z = J_z \cdot \ddot{\phi} ,$$

где  $J_z$  – момент инерции мотоцикла, относительно вертикальной оси,  $\ddot{\phi}$  – инерционное ускорение, относительно вертикальной оси.

Реакция на колесо от дороги в поперечном направлении, определяется по формуле:

$$F_{y i} = k_{a i} \cdot \alpha_i ,$$

где  $k_{a i}$  – коэффициент сопротивления боковому уводу (для шин мотоцикла составляет 15–40 кН/рад).

После преобразований получим

$$F_{\tau 1} = \frac{J_z \cdot \ddot{\phi} + k_{\alpha 2} \cdot \alpha_2 \cdot b - k_{\alpha 1} \cdot \alpha_1 \cdot \cos \theta \cdot a}{a \cdot \sin \theta} .$$

Аналогично определим значение силы  $F_{\tau 2}$ :

$$F_{\tau 2} = -F_{\tau 1} \cdot \cos \theta - F_{y1} \cdot \sin \theta + F_c \cdot \sin \delta + F_j \cdot \cos \delta,$$

где  $F_j$  – инерционная сила, определяемая по формуле:

$$F_j = m_a \cdot \frac{dV_a}{dt}.$$

Угол траекторного увода  $\delta$  является основным параметром регулирования большинства современных систем активной безопасности, поэтому рассмотрим его с точки зрения «критической дорожной ситуации».

Отклонение транспортного средства от заданной траектории является неблагоприятным фактором, однако оно обеспечивает «чувство дороги» у водителя. Угол траекторного увода обусловлен боковым уводом шины. Из рисунка 2 следует, что:

$$R_p \cdot \sin(\delta + \alpha_2) = b \cdot \sin(90^\circ - \delta).$$

Откуда, принимая во внимание, что углы  $\alpha_2$  и  $\delta$  малы, и используя ранее полученные уравнения, можно получить:

$$\delta = \frac{b}{R_p} - \alpha_2 = \frac{b}{R_p} - \frac{F_c}{k_{\alpha 2}} \cdot \frac{a}{L} = \frac{b}{R_p} - \frac{R_{z2} \cdot V_a^2}{R_p \cdot k_{\alpha 2} \cdot g} = \frac{b \cdot k_{\alpha 2} \cdot g - R_{z2} \cdot V_a^2}{R_p \cdot k_{\alpha 2}}.$$

С учетом преобразований, выражение для определения  $F_{\tau 2}$ :

$$F_{\tau 2} = \frac{J_z \cdot \phi + k_{\alpha 2} \cdot b - k_{\alpha 1} \cdot \alpha_1 \cdot \cos \theta \cdot a}{a \cdot \sin \theta} \cdot \cos \theta - k_{\alpha 1} \cdot \alpha_1 \cdot \sin \theta + \\ + m_a \cdot \frac{V_a^2}{R_p} \cdot \sin \left( \frac{b \cdot k_{\alpha 2} \cdot g - R_{z2} \cdot V_a^2}{R_p \cdot k_{\alpha 2}} \right) + m_a \cdot \frac{dV_a}{dt} \cdot \cos \left( \frac{b \cdot k_{\alpha 2} \cdot g - R_{z2} \cdot V_a^2}{R_p \cdot k_{\alpha 2}} \right) = A.$$

Для определения силы  $F_\mu$  используем выражение:

$$F_{\mu i} = \sqrt{F_{xi}^2 + F_{yi}^2}.$$

где  $i$  – номер колеса.

Ранее указывалось, что оптимальным является градиентный метод регулирования, при котором регулирующим параметром является соотношение  $dF_\mu / ds$ .

Значение величины  $S$  – проскальзывания колеса, можно определить по формуле:

$$S = \sqrt{s^2 + 2 \cdot (1 - \cos \alpha_1) \cdot (1 - s)},$$

где значение  $s$  определяем по формуле:

$$s = \frac{c}{V_a},$$

где  $c$  – постоянная величина (скорость скольжения шины).

Тогда

$$S_{sum} = \sqrt{\left(\frac{c}{V_a}\right)^2 + 2 \cdot (1 - \cos \alpha_i) \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{c}{V_a}\right)\right)}.$$

Используя полученные ранее выражения можно определить значение регулировочного параметра  $dF_\mu / ds$  для каждого колеса.

Для переднего колеса мотоцикла получаем выражение:

$$\frac{dF_{\mu 1}}{ds} = \frac{d \left( \sqrt{\left( \frac{J_z \cdot \ddot{\phi} + k_{\alpha 2} \cdot \alpha_2 \cdot b - k_{\alpha 1} \cdot \alpha_1 \cdot \cos \theta \cdot a}{a \cdot \sin \theta} \right)^2 + k_{\alpha 1}^2 \cdot \alpha_1^2} \right)}{d \left( \sqrt{\left(\frac{c}{V_a}\right)^2 + 2 \cdot (1 - \cos \alpha_1) \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{c}{V_a}\right)\right)} \right)}.$$

Для заднего колеса мотоцикла:

$$\frac{dF_{\mu 2}}{ds} = \frac{d\left(\sqrt{A^2 + k_{\alpha 2}^2 \alpha_2^2}\right)}{d\left(\sqrt{\left(\frac{c}{V_a}\right)^2 + 2 \cdot (1 - \cos \alpha_1) \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{c}{V_a}\right)\right)}\right)}.$$

Все параметры, представленные в данных уравнениях, определяются аппаратно с помощью датчиков, используемых в современных антиблокировочных системах, либо задаются как постоянные величины в блок управления АБС.

## Выводы

В данной статье предложен к использованию в системах АБС градиентный алгоритм управления. На основе данного алгоритма, разработана математическая модель для определения параметра регулирования при работе антиблокировочной системы. Математическое описание получено отдельно для переднего и заднего колеса, что подразумевает использование двухканальных систем АБС, как более современных и эффективных. Важным фактором является то, что для математического определения параметра регулирования, возможно использование той сенсорной базы, которую используют классические системы АБС, однако потребуется более мощное аппаратное обеспечение блока управления АБС. Полученные результаты могут быть успешно использованы для моделирования процесса торможения мотоцикла с АБС в Matlab и Amesim, а в дальнейшем и полунатурального моделирования на HILLS-стендах с настройкой работы систем для серийного применения.

## Литература

1. Мотоцикл. Конструкция, теория, расчет. С. Ю. Иваницкий, Б. С. Карманов, В. В. Рогожин, А. Т. Волков, Москва : «Машиностроение», 1971. – С. 43–58.

2. Активная безопасность автомобиля. В. Г. Бутылин, М. С. Высоккий, В. Г. Иванов, И. И. Лепешко, Минск : «Белавтотракторостроение», 2002. – С. 45–50.

3. Aspects of the lateral and longitudinal control of automobiles. Robin S. Sharp, Bedford MK 43 0AL, UK : School of Mechanical Engineering Cranfield University, 2002.

4. A motorcycle model for stability and control analysis. Robin S. Sharp, David J. N. Limebeer, Bedford MK 43 0AL, UK : School of Mechanical Engineering , Cranfield University, 2002.

5. Active safety and braking control for two-wheel vehicles. Ivanov Valentin, Mikhailtsevich Mikalai, Paris: Proc. of 9<sup>th</sup> European Automotive Congress, 2003. – P. 51.

6. The perspective ABS for two-wheeled vehicles. Mikhailtsevich Mikalai, Barcelona: FISITA 2004 Proceedings, 2004.

7. Simulation of Brake Control for Motorcycles. Ivanov Valentin, Mikhailtsevich Mikalai, Shirokov Baris. SAE Technical Paper Series, ISSN 0148-7191, 2004.

8. Modeling the braking process for motorcycle using Tire Hardware-In-the-Loop Simulator (Tire HILS). Mikhailtsevich Mikalai, Munich, Germany: Proc. of FISITA 2008, 2008.

9. Моделирование процесса торможения двухколесного транспортного средства. Михальцевич Н. Р., Баханович А. Г., Минск : Научно-практический журнал «Новости науки и технологий» ISSN 2075-7204 № 2, 2015. – С. 36–40.

10. Управление торможением двухколесных одноколейных транспортных средств. Применение систем АБС на мотоциклах. Михальцевич Н. Р., Тюмень : Сборник докладов, 10-ая международная конференция «Организация и безопасность дорожного движения» ISBN 978-5-9961-1397, 2017. – с.80–87.

Статья поступила 01.12.2021

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОЛЕСНОЙ МАШИНЫ С КОМБИНИРОВАННЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ДЛИННОМЕРНЫХ ГРУЗОВ**

*Исаченков В. С.*<sup>1</sup>, ст. преп, *Клоков Д. В.*<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
*Лешкевич А.Ю.*<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
*Леонов Е. А.*<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.,

<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: *ivsby\_minsk@mail.ru*

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: *klokov\_dm@bntu.by*

## **MATHEMATICAL MODEL OF A WHEELED MACHINE FOR HANDLING LONG LOADS IN SPECIAL WORKING CONDITIONS**

*V. Isachenkov*<sup>1</sup>, Senior Lecturer,

*D. Klokov*<sup>2</sup>, PhD in Engineering, Assistant Professor,

*A. Leshkevich*<sup>2</sup>, PhD in Engineering, Assistant Professor,

*E. Leonov*<sup>1</sup>, PhD in Engineering, Assistant Professor,

<sup>1</sup>Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus,  
*ivsby\_minsk@mail.ru*

<sup>2</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus,  
e-mail: *klokov\_dm@bntu.by*

*При перемещении длинномерных грузов в особых условиях работы повышение тягово-динамических качеств колесных машин может быть достигнуто совершенствованием конструкции технологического оборудования. Такими изменениями можно добиться перераспределения нагрузок на несущую систему машины в процессе движения, снизить динамическую нагруженность, увеличить долговечность узлов и агрегатов.*

*В статье представлена математическая модель движения колесной машины с комбинированным технологическим оборудованием, которая позволяет определить оптимальные параметры машины для конкретных природно-климатических условий работы. Это снизить энергетические затраты, время технологического цикла и увеличить производительность машины в процессе транспортировки длинномерных грузов.*

*Ключевые слова: математическая модель, движение, колесная машина, технологическое оборудование, динамическая нагруженность, энергозатраты.*

*When moving long loads in special working conditions, an increase in the traction and dynamic qualities of wheeled vehicles can be achieved by improving the design of technological equipment, the correct choice of which is due to the natural and climatic conditions of work. With such changes, it is possible to achieve a redistribution of loads on the supporting system of the machine in the process of movement, to reduce the dynamic load, to increase productivity and durability.*

*The article presents the results of theoretical studies of the movement of a wheeled vehicle with technological equipment in the form of a mounted pincer gripper, which made it possible to determine the parameters of the machine, minimize dynamic loading and energy costs during the transportation of long cargo.*

*Keywords: mathematical model, motion, wheeled vehicle, technological equipment, dynamic loading.*

## **Введение**

Процесс перемещения длинномерных грузов в особых условиях работы, в частности на почвогрунтах со слабой несущей способностью, включает в себя взаимосвязанные последовательные операции, таких как холостой ход колесной машины, формирование пачки длинномерного груза, рабочий ход и разгрузку пачки.

В Республике Беларусь для указанных условий работы в настоящее время предлагается использовать колесные машины (КМ) с шарнирно-сочлененной рамой АМКОДОР 2243, на заднем технологическом модуле которой установлен полноповоротный гидроманипулятор с грейферным захватом для сбора деревьев и хлыстов и укладки

их в гидрозажимной коник (НКН), а так же АМКОДОР 2243В с навесным канатно-чокерным технологическим оборудованием (НКЧ) (рисунок 1).



а) АМКОДОР 2243; б) АМКОДОР 2243 В

Рисунок 1 – Типаж машин АМКОДОР с технологическим оборудованием различных компоновочных решений.

Для преодоления участка дорожного полотна со слабой несущей способностью почвогрунта при буксовании для этих машин в технологическом оборудовании выявлены существенные недостатки, в частности, для канатно-чокерного оборудования во время рабочего хода используется прием сброса пачки с последующим ее подтаскиванием, что существенно снижает производительность.

В качестве решения данной задачи предлагается объединить на базе одной машины оба варианта, а также изменить конструкцию для канатно-чокерного технологического оборудования установкой дополнительной опорной системы с возможностью использования в качестве как навесного (НКЧ), так и прицепного варианта (ПКЧ).

Это позволит разделить перемещаемую пачку длинномерного материала в оптимальном соотношении, перераспределить нагрузку на несущую систему в процессе движения, тем самым снизить динамическую нагруженность и повысить производительность труда.

В начальный момент буксования технологическое оборудование переводится из навесного положения в прицепное, что позволяет КМ не теряя темпа работы преодолевать проблемный участок дорожного полотна. После преодоления указанного участка КМ, канатно-чокер-

ного технологического оборудование переводится в навесное положение, что значительно снижает энергетические потери во время преодоления участков дорожного полотна с удовлетворительной несущей способностью почвогрунта.

Таким образом, существует необходимость проведения комплексных исследований по обоснованию параметров КМ, оснащенной комбинированным технологическим оборудованием.

Основным методом теоретических исследований в настоящее время является разработка математических моделей движения специальных транспортных средств различного назначения на основе методов системного подхода и синтеза.

## **Основная часть**

Основные принципы построения расчетных схем и составления математических моделей движения КМ оснащенной комбинированным технологическим оборудованием, имеют допущения, аналогичные математическому аппарату, представленному в ранее выполненных работах. На рисунке 3 приведена расчетная схема динамической системы КМ, разработанная с учетом принятых допущений на основе анализа ее конструкции и кинематики движения звеньев [1–5].

Разработка расчетной схемы и соответствующих ей уравнений движения КМ является одним из основных этапов исследования ее динамики и обоснования параметров. Они отражают сложное взаимодействие подсистем КМ (двигатель, трансмиссия, ходовая часть), технологического оборудования и предмета труда (пачки длинномерного груза), а также учитывают реальные возмущающие воздействия внешнего и внутреннего характера (неровности микропрофиля дорожного полотна, крутящий момент двигателя и т. д.).

Такой подход предполагает нахождение независимых, изменяющихся во времени координат (степеней свободы), определяющих положение всех масс данной машины при рассмотрении переходных и установившихся режимов движения, что позволяет наряду с задачами общей динамики решать круг вопросов, связанных с нагруженностью узлов и агрегатов.

Для представленной КМ характерна раздельно-агрегатная компоновка. В расчетной схеме двигатель, трансмиссия, ведущие мосты

и т. д. представлены как подсистемы, соединенные между собой упругими элементами.

Представленная расчетная схема динамической системы имеет девятнадцать степеней свободы, описывающих колебания системы в продольной вертикальной плоскости (рисунок 2) [7–11].

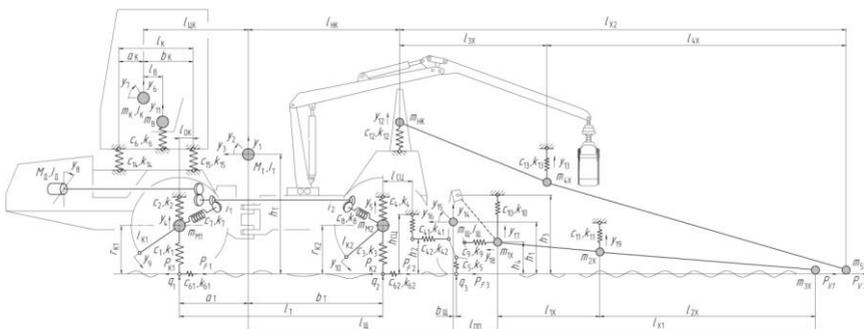


Рисунок 2 – Расчетная схема динамической системы КМ с НКН и ПКЧ

Положение колесной машины (КМ) с комбинированным технологическим оборудованием, состоящим из манипулятора с клещевым захватом, навесным гидрозажимным коником (НКН) и прицепным канатно-чокерным оборудованием (ПКЧ), определяется следующими обобщенными координатами: вертикальным, угловым и продольным перемещением центра тяжести КМ –  $y_1$ ,  $y_2$  и  $y_3$ ; вертикальным перемещением центра тяжести переднего и заднего мостов КМ –  $y_4$  и  $y_5$ ; вертикальным и угловым перемещением центра тяжести кабины –  $y_6$  и  $y_7$ ; углом поворота коленчатого вала двигателя –  $y_8$ ; углами поворота передних и задних колес КМ –  $y_9$  и  $y_{10}$ ; вертикальным перемещением центра тяжести водителя и сидения –  $y_{11}$ ; вертикальными перемещениями дискретных масс НКН и верхней пачки длиннономерного груза –  $y_{12}$ ,  $y_{13}$ ; вертикальным, угловым и продольным перемещением центра тяжести ПКЧ –  $y_{14}$ ,  $y_{15}$  и  $y_{16}$ ; вертикальными и продольными перемещениями дискретных масс нижней пачки длиннономерного груза –  $y_{17}$ ,  $y_{18}$  и  $y_{19}$ .

Основными возмущающими воздействиями внешнего и внутреннего характера, влияющим на динамику КМ, являются неровности дорожного полотна и крутящий момент двигателя.

Возмущающие воздействия внешнего характера принято представлять в виде дискретных массивов микропрофилей неровностей дорожного полотна, которые задаются с помощью значений ординат, снятых с наиболее характерных опытных реальных участков. Эти массивы выражаются как функция времени, с учетом запаздывания задних колес КМ по отношению к передним.

Для рассматриваемых динамических системы КМ принята модель двигателя, в которой  $M_d$  является функцией от частоты вращения колечатого вала, а выбор значений крутящего момента производился по регуляторной характеристике.

Посредством математического аппарата и на основе системы высокоуровневого программирования *MATLAB 7.11.0 (R2010b)* можно получить матрицы численных значений отклонений степеней свободы моделей, первые и вторые производные этих отклонений и соответствующие им моменты времени протекания процесса. Полученные в результате теоретических исследований данные позволяют определить все необходимые параметры оценки динамической нагруженности КМ оснащенной комбинированным технологическим оборудованием при перемещении длинномерного груза в особых условиях работы.

## **Заключение**

Разработанная математическая модель движения колесной машины с комбинированным технологическим оборудованием позволяет определить оптимальные параметры для конкретных природно-климатических условий работы, тем самым добиться перераспределения нагрузок на несущую систему машины в процессе движения, снизить динамическую нагруженность, увеличить долговечность узлов и агрегатов, уменьшить энергетические затраты и время технологического цикла, увеличить производительность машины для транспортировки длинномерных грузов.

## **Литература**

1. Протас, П. А., Клоков, Д. В. Аналитическое исследование процесса взаимодействия колесных трелевочных машин с пачкой хлыстов и волоком // Актуальные направления научных исследований

XXI века : теория и практика. 2014. – Т. 2. – № 5–4. – С. 256–260.  
DOI : 10.12737/7110.

2. Кононов, А. М. Исследование реализации тягово-сцепных качеств и агротехнической проходимости колесных тракторов на суглинистых почвах Беларуси: автореф. дис. д-ра техн. наук. – Горки: БСХА, 1974. – 41 с.

3. Соколова, В. А., Петров, И. П. Исследование взаимодействия арочного колеса с опорной поверхностью // Труды НАМИ. – 1962. Вып. 54. – С. 64 – 72.

4. Хайлис, Г. А. К теории качения пневматического колеса // Тракторы и сельхозмашины. – 1963. – № 3. – С. 5–7.

5. Исаченков, В. С., Симанович, В. А. Обоснование параметров канатно-чokerного технологического оборудования // Труды БГТУ. 2012. – № 2: Лесная и деревообrab. пром-сть. – С. 39–42.

6. Исаченков, В. С., Симанович В. А. Обоснование параметров прицепного технологического оборудования колесных трелевочных машин // Труды БГТУ. 2016. – № 2: Лесная и деревообrab. пром-сть. С. 23–27.

7. Лагранж, Ж. Аналитическая механика / Ж. Лагранж. – М. : Гос. изд-во техн.-теорет. лит-ры, 1950. – 440 с.

8. Леонов, Е. А. Специфика двухступенчатой трелевки древесины на предприятиях лесного комплекса / Е. А. Леонов, Д. В. Клоков, В. С. Исаченков [и др.] // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн : материалы 85-й научно-технической конференции с международным участием, Минск. – Минск : БГТУ, 2021. – С. 87–89.

9. Исаченков, В. С. Математическая модель колесной трелевочной машины / В. С. Исаченков, В. А. Симанович // Труды БГТУ. № 2. Лесная и деревообrabывающая промышленность. – 2011. – № 2. – С. 75–81.

10. Исаченков, В. С. К вопросу выбора типа прицепного технологического оборудования колесных трелевочных машин / В. С. Исаченков, В. А. Симанович // Труды БГТУ. – Серия 1 : Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2020. – № 2 (234). – С. 199–204.

11. Клоков, Д. В. Оценка соответствия типов компонентов ходовой части колесных скиддеров / Д. В. Клоков, А. А. Гарабажиу,

Е. А. Леонов // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии : сборник научных статей. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 174–181.

Статья поступила 06.12.2021

УДК 656.13

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ МАРШРУТНОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА ПРИМЕНЕНИЕМ СЕКТОРАЛЬНОГО МЕТОДА**

*Семченков С. С.*, ст. преп., *Капский Д. В.*, декан, д-р тех. наук, доц.,  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: *d.kapsky@bntu.by*

## **IMPROVING THE EFFICIENCY OF ROUTE PASSENGER TRANSPORT USING THE SPECTRAL METHOD**

*S. Semtchenkov*, senior lecturer,  
*D. Kapski*, Dean, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,  
Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus,  
e-mail: *d.kapsky@bntu.by*

*В составе затрат предприятий транспорта доля заработной платы водителей эксплуатационного парка составляет 30–50 %, формируется интерес к рассмотрению данной статьи затрат в части именно эффективности организации перевозочного процесса (снижение непроизводственных затрат, повышение средней эксплуатационной скорости и т. д.), так как условия оплаты труда водителей транспортных средств ни в коем случае не должны быть ухудшены. Для снижения уровня непроизводственных затрат на ос-*

нове предложенной модели и целевой функции разработан секторальный метод организации работы водителей, отличающийся совмещением и чередованием маршрутов внутри сектора и обеспечивающий равномерную сменяемость (чередование) водителей по этим маршрутам, учитывающий среднюю продолжительность рабочей смены водителя на маршрутах, входящих в сектор. Для реализации секторального метода разработана методика оптимального формирования секторов, основанная на подборе такой комбинации маршрутов в секторе, которая будет реализовывать принцип обеспечения равноценной производственной нагрузки, при этом дополнительно учитывать ряд критериев, влияющих на выбор совмещаемых маршрутов. Подбор и расстановка водителей на каждое маршрутное транспортное средство в рамках каждого сектора осуществляются только в пределах, сформированных формулой сектора с учетом налагаемых ограничений. Для реализации разработанной методики формирования секторов автором разработан алгоритм и компьютерная программа, существенно облегчающая внедрение секторального метода и его практическую реализацию.

Ключевые слова: маршрутный пассажирский транспорт, организация перевозок, маршрутные транспортные средства, санпр режима труда и отдыха водителей, график работ

*As part of the costs of transport enterprises, the share of the wages of drivers of the operating fleet is 30–50 %, interest is being formed in considering this cost item in terms of the efficiency of organizing the transportation process (reducing non-production costs, increasing the average operating speed, etc.), since the conditions the wages of drivers of vehicles should in no way be worsened. To reduce the level of non-production costs, on the basis of the proposed model and target function, a sectoral method for organizing the work of drivers has been developed, which is characterized by the combination and alternation of routes within the sector and ensures uniform turnover (alternation) of drivers along these routes, taking into account the average duration of a driver's work shift on routes included in the sector. To implement the sectoral method, a technique has been developed for the optimal formation of sectors, based on the selection of such a combination of routes in the sector, which will implement the principle of ensuring an equal-value production load, while additionally taking into account a number of criteria affecting the choice*

*of combined routes. The selection and placement of drivers for each route vehicle within each sector is carried out only within the limits formed by the sector formula, taking into account the imposed restrictions. To implement the developed methodology for the formation of sectors, the author has developed an algorithm and a computer program that greatly facilitates the introduction of the sectoral method and its practical implementation.*

*Keywords: route passenger transport, organization of transportation, route vehicles, CAD work and rest regime of drivers, work schedule*

## **Введение**

Рассмотрению вопроса эффективности перевозок с точки зрения организации процесса перевозок в различные периоды развития науки, экономики и общества посвящались работы Зильбертала А. Х. [1], Гудкова В. А., Вельможина А. В. [2], Спирина И. В. [3], Седюкевича В. Н. [4], Скирковского С. В. [5] и др. В частности, Седюкевичем В. Н. отмечается, что в целях оценки эффективности и качества перевозок можно использовать затраты перевозчика на перевозку одного пассажира, которые определяются удельными затратами на 1 км пробега транспортного средства, средней длиной поездки пассажира (в прямо пропорциональной зависимости), а также пассажироместимостью транспортного средства и коэффициентом использования пассажироместимости (в обратно пропорциональной зависимости) [4]. Развивая эту тему, Скирковский С. В. разработал методику повышения эффективности перевозок пассажиров, основанную на нахождении оптимальных значений пассажироместимости используемых для обслуживания данного маршрута транспортных средств и учитывающую ряд социально-экономических факторов [5]. При устойчивом характере пассажиропотока применяется маршрутная технология обслуживания, при этом учет потребностей пассажиров в совершении поездок во времени обеспечивается организацией работы по расписанию движения [4], которое составляется в соответствии с выявленными закономерностями изменения пассажиропотоков по характерным дням недели (рабочие дни, выходные дни), сезонам года для каждого маршрута. В свою очередь, график работ, являющийся документом среднесрочного планирования, служит осно-

вой для организации эксплуатационной работы и определяет качество функционирования всех служб предприятия маршрутного пассажирского транспорта [6, 7]. Следует отметить, что имеются некоторые работы, рассматривающие вопросы оптимизации работы транспортных средств, осуществляемой на этапе составления расписания движения транспортного средства, но только в течение одного календарного дня (зарубежный подход) [например, 8, 9], и решаемые, как правило, методами теории расписания (например, путем решения задачи построения расписания выполнения  $N$  заданий на  $M$  машинах при различной и для каждого из заданий очередности следования операций [10]), но при этом, опять же, не затрагивающие принципы составления графика работ. Имеющиеся исследования, в целом, ограничиваются решением вопросов составления расписания движения и не принимают во внимание, что основополагающим документом для организации эксплуатационной работы является именно месячный график работ [11]. Таким образом, рассмотренными научными работами не решена задача повышения эффективности работы маршрутного пассажирского транспорта путем системного снижения непроизводительных затрат на этапе составления графика работ в рамках среднесрочного планирования.

### **Повышение эффективности работы маршрутного пассажирского транспорта применением секторального метода**

Для определения степени неравномерности в качестве оценочного критерия предложен критерий средней продолжительности рабочей смены водителя на маршруте  $t_{срми}$ , отличающийся учетом режима работы маршрута в течение времени суток, а именно, продолжительности конкретных рабочих смен водителей по дням недели и количества таких дней в рассматриваемом календарном периоде, значение которого определяется по формуле (1):

$$t_{срми} = \frac{n_{р\partial} \cdot \sum_{j=1}^{n_{pi}} t_j + n_{\partial\partial} \cdot \sum_{j=1}^{n_{ei}} t_j}{n_{pi} \cdot n_{р\partial} + n_{ei} \cdot n_{\partial\partial}}, \quad (1)$$

где  $t_j$  – продолжительность  $j$ -ой рабочей смены;  $n_{рд}$ ,  $n_{вд}$  – количество рабочих и выходных дней соответственно в календарном месяце;  $n_{рi}$ ,  $n_{ви}$  – количество рабочих смен на  $i$ -м маршруте по расписанию рабочих и выходных дней соответственно.

Дополнительно вводится критерий средней продолжительности рабочей смены водителя в целом по рассматриваемым маршрутам  $t_{срм}$ , значение которого определяется по формуле (2):

$$t_{срм} = \frac{n_{р\partial} \cdot \sum_{j=1}^{n_{рм}} t_j + n_{\partial\partial} \cdot \sum_{j=1}^{n_{\partialм}} t_j}{n_{рм} \cdot n_{р\partial} + n_{\partialм} \cdot n_{\partial\partial}}, \quad (2),$$

где  $t_j$  – продолжительность  $j$ -ой рабочей смены;  $n_{рд}$ ,  $n_{вд}$  – количество рабочих и выходных дней соответственно в календарном месяце;  $n_{рм}$ ,  $n_{\partialм}$  – количество рабочих смен в целом по рассматриваемым маршрутам по расписанию рабочих и выходных дней соответственно.

Тогда для каждого маршрута по формуле (3) можно определить отклонение  $\Delta_{и}$  средней продолжительности рабочей смены на маршруте от средней продолжительности рабочей смены по рассматриваемым маршрутам:

$$\Delta_{и} = t_{срми} - t_{срм}. \quad (3),$$

Если  $\Delta_{и} < 0$ , то у водителя  $i$ -го маршрута возникает неоплачиваемая недоработка в эквиваленте, рассчитанном по штатному расписанию.

Если  $\Delta_{и} > 0$ , то у водителя  $i$ -го маршрута возникает оплачиваемая переработка, в эквиваленте, рассчитанном по штатному расписанию в увеличенном размере [11].

Отклонение рабочего времени водителей  $T_{\Delta i}$  в целом по маршруту, с учетом числа водителей  $n_{вод}$ , которые заняты обслуживанием  $i$ -го маршрута, и количество рабочих смен  $n_{рс}$ , планируемого для каждого из водителей в месяц, исходя из нормы рабочего времени по производственному календарю, определяется по формуле (4):

$$T_{\Delta i} = n_{вод} \cdot n_{рс} \cdot \Delta_{и}. \quad (4)$$

Теперь можно оценить уровень непроизводственных затрат  $L_{cyi}$ , возникающих в связи с необходимостью оплаты сверхурочного времени в размере  $l_{cy} = 8$  BYN за каждый час сверхурочного времени водителям, имеющим переработку, по формуле (5):

$$L_{cyi} = \max(l_{cy} \cdot T_{\Delta i}; 0) . \quad (5)$$

Результаты расчета для условного месяца с  $n_{рд} = 20$ ,  $n_{вд} = 10$ , выполненного по данным для некоторых маршрутов трамвая в г. Минске (по состоянию на 2019 г.), сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Расчет значений оценочных критериев и уровня непроизводственных затрат, связанных с оплатой в условном месяце

Маршрут	$t_{срр}$ , ч	$n_{pi}$	$t_{срв}$ , ч	$n_{vi}$	$t_{срmi}$ , ч	$\Delta t_i = t_{срmi} - t_{срm}$ , ч	$n_{вод}$	$T_{\Delta i}$ , ч	$L_{cyi}$ , BYN
1	7,77	24	7,55	18	7,71	-0,29	33	-171,6	-
3	7,72	26	7,57	18	7,68	-0,32	35	-224,0	-
4	8,90	10	8,30	8	8,73	0,73	14	204,4	1635,20
5	8,70	10	8,90	8	8,76	0,76	14	212,8	1702,40
В целом по рассматриваемым маршрутам:						$t_{срm}$ , ч	8,0	$L_{сум}$ , BYN	3337,60

Для сокращения уровня непроизводственных затрат  $L_{cy}$ , возникающих в связи с необходимостью оплаты сверхурочного времени, из формулы (5) вытекает объективная необходимость минимизации  $T_{\Delta i}$  при неизменном  $l_{cy}$ . Таким образом, рассмотренная выше модель сводится к минимизации по критерию оптимальности (6) с использованием следующей зависимости:

$$L_{cyi} = \max \left( l_{cy} \cdot n_{вод} \cdot n_{pc} \left[ \frac{n_{pд} \sum_{j=1}^{n_{pi}} t_j + n_{вд} \sum_{j=1}^{n_{vi}} t_j}{n_{pi} n_{pд} + n_{vi} n_{вд}} - \frac{n_{pм} \sum_{j=1}^{n_{pm}} t_j + n_{вд} \sum_{j=1}^{n_{vm}} t_j}{n_{pm} n_{pд} + n_{vm} n_{вд}} \right]; 0 \right) \rightarrow \min \cdot (6)$$

Для решения поставленной задачи предложен секторальный метод организации работы водителей, отличающийся совмещением и чередованием маршрутов внутри сектора и обеспечивающий равномерную сменяемость (чередование) водителей по этим маршрутам, учитывающий среднюю продолжительность рабочей смены водителя на маршрутах, входящих в сектор. Таким образом, сектор – это своеобразная универсальная маршрутно-производственная структура включающая, как правило, два маршрута, подобранных на основе описанного выше принципа в соответствии с критерием оптимальности (6) с учетом влияния дополнительного критерия схожести трассы маршрута и других критериев, которые могут быть использованы, и тем самым гарантирующая равномерное обеспечение работой водителей в течение месяца так, что влияние факторов, определяющих уровень непроизводственных затрат  $L_{cy}$  будет сведено к минимуму. В соответствии с секторальным методом транспортные средства с водителями, их обслуживающими, закрепляются за секторами, включающими в себя несколько маршрутов, равномерно чередуются между ними, что в конечном счете обеспечивает сокращение уровня  $L_{cy}$  на 70–95 %.

Для реализации секторального метода разработана методика оптимального формирования секторов, основанная на подборе такой комбинации маршрутов в секторе, которая будет реализовывать принцип обеспечения равноценной производственной нагрузки, при этом дополнительно учитывать ряд критериев, влияющих на выбор совмещаемых маршрутов. К таким критериям относятся:

1. Модуль отклонения средней продолжительность рабочей смены водителя в паре объединяемых маршрутов от средней продолжительности рабочей смены водителя в целом по рассматриваемым маршрутам  $|\Delta t_{cpij}|$ , значение которого определяется по формуле (7), как показатель приближения к средней продолжительности рабочей смены:

$$|\Delta t_{cpij}| = \left| \frac{n_{p\partial} \left( \sum_{k=1}^{n_{pi}} t_k + \sum_{k=1}^{n_{pj}} t_k \right) + n_{e\partial} \left( \sum_{k=1}^{n_{ei}} t_k + \sum_{k=1}^{n_{ej}} t_k \right)}{n_{p\partial} (n_{pi} + n_{pj}) + n_{e\partial} (n_{ei} + n_{ej})} - \frac{n_{p\partial} \sum_{k=1}^{n_{pm}} t_k + n_{e\partial} \sum_{k=1}^{n_{em}} t_k}{n_{pm} n_{p\partial} + n_{em} n_{e\partial}} \right|, \quad (7)$$

где  $t_k$  – продолжительность  $k$ -ой рабочей смены;  $n_{рд}$ ,  $n_{вд}$  – количество рабочих и выходных дней соответственно в календарном месяце;  $n_{рi}$ ,  $n_{вi}$  – количество рабочих смен на  $i$ -ом маршруте по расписанию рабочих и выходных дней соответственно;  $n_{рj}$ ,  $n_{вj}$  – количество рабочих смен на  $j$ -ом маршруте по расписанию рабочих и выходных дней соответственно;  $n_{рм}$ ,  $n_{вм}$  – количество рабочих смен в целом по рассматриваемым маршрутам по расписанию рабочих и выходных дней соответственно.

2. Коэффициент схожести трасс маршрута  $k_{схij}$ , характеризующий общность трасс объединяемых маршрутов и вычисляемый по формуле (8)

$$k_{схij} = \frac{2d_{об}}{d_i + d_j}, \quad (8)$$

где  $k_{схij}$  – продолжительность  $k$ -ой рабочей смены;  $d_{об}$  – протяженность общей части трассы  $i$ -го и  $j$ -го маршрутов;  $d_i$ ,  $d_j$  – протяженность трассы  $i$ -го и  $j$ -го маршрутов.

Для подготовки исходных данных удобно представить маршрутную сеть в виде скелетной схемы (рисунок 1), формализованного типа, с обозначением каждой узловой точки, как вершины графа и присвоением каждому ребру графа значения (в рассматриваемом примере  $d_{12} = 0,6$  км;  $d_{23} = 0,6$  км;  $d_{34} = 0,7$  км;  $d_{45} = 5,8$  км;  $d_{46} = 3,4$  км;  $d_{37} = 0,5$  км;  $d_{78} = 3,3$  км).

3. Признак наличия общей конечной станции  $k_{осij}$ , на которой производятся пересменка водителей (с 1-ой на 2-ую смены), принимающий значения 1, если маршруты  $i, j$  имеют такую конечную станцию, и 0, если не имеют. Данный критерий введен, т. к. конечная станция рассматривается как постоянное место контакта водителей с непосредственным руководителем, позволяет оптимизировать работу руководителя, исключая необходимость «поиска водителя» в различных точках маршрутной сети для проведения предупредительной, профилактической, информационной работы (справочно: в рабочее время водителя включается подготовительное время 15–20 мин. перед началом работы во вторую смену). Фактически далее решение задачи сводится к математической задаче линейного программиро-

вания специального вида (транспортной задаче [12]), в которой в качестве «запасов»  $a_i$  и «потребностей»  $b_j$ , соответствующих паре объединяемых маршрутов  $i$  и  $j$ , выступают единичные значения, а в качестве «удельных стоимостей транспортировки»  $d_{ij}$  из  $i$ -го в  $j$ -й пункты выступают значения искусственной целевой функции  $W_{ij}$ , определенные для каждого возможного сочетания маршрутов  $i$  и  $j$  по формуле (9). По сути  $W_{ij}$  является суммой нормированных значений рассмотренных выше критериев с учетом весовых коэффициентов, значения которых могут варьироваться и выбираться индивидуально для каждого предприятия транспорта в зависимости от принятых приоритетов:

В результате решения транспортной задачи будут получены  $x_{ij} = 1$ , показывающие какой  $i$ -й маршрут должен быть объединен с  $j$ -м маршрутом в единый сектор.

Также следует отметить, что важным условием объединения маршрутов в сектора является принцип единства используемых в каждом секторе транспортных средств по признаку схожести параметров транспортного средства (одного типа, вида, класса пассажироместности, схемы, концепции, например, одиночный, сочлененный, троллейбусы, построенные по концепции ИМС, троллейбусы, построенные по концепции ИМФ и т. д.), что гарантирует сектору универсальность.

$$W_{ij} = w_{\Delta t_{cpij}} \left| \overline{\Delta t_{cpij}} \right| + w_{k_{cxij}} \left( 1 - \overline{k_{cxij}} \right) + w_{k_{ocij}} \left( 1 - \overline{k_{ocij}} \right), \quad (9)$$

где  $\left| \overline{\Delta t_{cpij}} \right|$  – нормированное значение модуля отклонений  $|\Delta t_{cpij}|$ ;  $\overline{k_{cxij}}$  – нормированное значение коэффициента  $k_{cxij}$ ;  $\overline{k_{ocij}}$  – нормирование значения признака  $k_{ocij}$ ;  $w_{\Delta t_{cpij}}$ ,  $w_{k_{cxij}}$ ,  $w_{k_{ocij}}$  – весовые коэффициенты, определяющие значимость каждого из критериев (в рассматриваемом примере принимаются  $w_{\Delta t_{cpij}} = 0,5$ ,  $w_{k_{cxij}} = 0,25$ ,  $w_{k_{ocij}} = 0,25$ ).

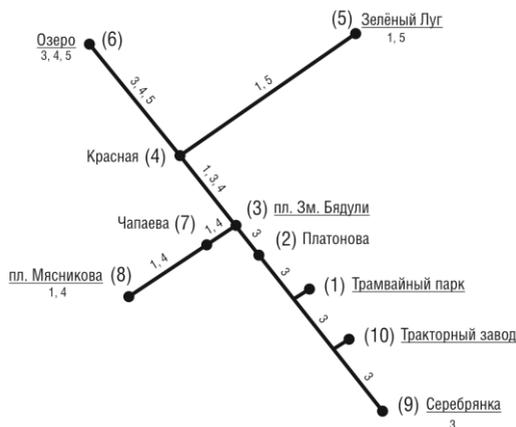


Рисунок 1 – Формализованная схема маршрутной сети

Так как  $\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j$  транспортная задача является «сбалансированной» и далее фактически требуется найти такой план, т. е. такие  $x_{ij} \geq 0$ , чтобы «суммарная стоимость перевозок»  $Q \rightarrow \min$ , то есть

$$Q = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left( w_{\Delta t_{cpij}} |\overline{\Delta t_{cpij}}| + w_{k_{csij}} (1 - \overline{k_{csij}}) + w_{k_{ocij}} (1 - \overline{k_{ocij}}) \right) x_{ij} \rightarrow \min.$$

В таблице 2 сведены значения критериев для решения задачи по исходным данным, приведенным в таблице 1, при этом следует обратить внимание, что «диагональ» ( $i = j$ ) не заполняется, так как маршрут не может «объединяться» сам с собой, а заполнение элементов правее этой диагонали не имеет смысла, так как приведёт лишь к дублированию с последующим «избыточным» решением.

В таблице 3 показаны оптимальные сочетания маршрутов, формирующих сектора, полученные решением транспортной задачи любым известным для этого методом.

Из таблицы 3 видно, что  $x_{51} = 1$ ,  $x_{43} = 1$ , что указывает на необходимость объединения в сектора маршрутов № 5 и 1 (сектор «5–1»), и маршрутов № 4 и 3 (сектор «4–3»).

Таблица 2 – Значения критериев, определяющих выбор совмещаемых маршрутов

Пара объединяемых маршрутов	1	3	4	5	max
а) значения модуля отклонений $ \Delta t_{epij} $					0,371
1	–	–	–	–	–
3	0,153	–	–	–	–
4	0,006	0,010	–	–	–
5	0,011	0,006	0,371	–	–
б) значения коэффициента схожести трасс маршрутов $k_{exij}$					0,595
1	–	–	–	–	–
3	0,059	–	–	–	–
4	0,495	0,387	–	–	–
5	0,595	0,302	0,398	–	–
в) значения признака наличия общей конечной станции, на которой производятся смены водителей $k_{ocij}$					1
1	–	–	–	–	–
3	0	–	–	–	–
4	0	1	–	–	–
5	1	1	1	–	–
г) значения искусственной функции $W_{ij}$ как $d_{ij}$					
1	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	–
3	0,681	$\infty$	$\infty$	$\infty$	–
4	0,301	0,101	$\infty$	$\infty$	–
5	0,014	0,131	0,583	$\infty$	–

В качестве оценочного критерия целесообразно определить среднюю продолжительность рабочих смен в секторе  $t_{c(ij)}$ , образованном  $i$ -м и  $j$ -м маршрутами, по формуле (10):

$$t_{c(ij)} = \frac{n_{p\partial} \left( \sum_{k=1}^{n_{pi}} t_k + \sum_{k=1}^{n_{pj}} t_k \right) + n_{e\partial} \left( \sum_{k=1}^{n_{ei}} t_k + \sum_{k=1}^{n_{ej}} t_k \right)}{n_{p\partial} (n_{pi} + n_{pj}) + n_{e\partial} (n_{ei} + n_{ej})}, \quad (10)$$

где  $t_k$  – продолжительность  $k$ -ой рабочей смены;  $n_{p\partial}$ ,  $n_{e\partial}$  – количество рабочих и выходных дней соответственно в календарном месяце;  $n_{pi}$ ,  $n_{ei}$  – количество рабочих смен на  $i$ -ом маршруте по расписанию рабочих и выходных дней соответственно;  $n_{pj}$ ,  $n_{ej}$  – количество рабочих смен на  $j$ -ом маршруте по расписанию рабочих и выходных дней соответственно.

Таблица 3 – Найденные оптимальные сочетания маршрутов, формирующих сектора

Пара объединяемых маршрутов $i, j$		1	3	4	5
$a_i / b_i$		1	1	1	1
1	1	999999 9	999999 9	9999999	9999999
3	1	0,681	999999 9	9999999	9999999
4	1	0,301	1 0,101	9999999	9999999
5	1	1 0,014	0,131	0,583	9999999

Значения данного показателя, для созданных секторов  $t_{c(51)} = 8,02$ ,  $t_{c(43)} = 7,98$ . При этом значения отклонений от средней продолжительности рабочей смены по маршрутам составляют  $\Delta_{t(51)} = 8,02 - 8,00 = 0,02$  и  $\Delta_{t(43)} = 7,98 - 8,00 = -0,02$ , что не является критичным.

Для данного сектора можно определить уровень затрат

$$L_{cy(секм)} = L_{cy(51)} + L_{cy(43)} = \max(l_{cy} \cdot T_{D(51)}; 0) + \max(l_{cy} \cdot T_{D(43)}; 0) = \max(8 \cdot 47 \cdot 20 \cdot 0,02; 0) + \max(8 \cdot 47 \cdot 20 \cdot [-0,02]; 0) = 150,40 \text{ BYN.}$$

Сравнение полученного значения с  $L_{сум}$  (до применения секторального метода) показывает, что уровень непроизводственных затрат, связанных с необходимостью оплаты водителям времени сверхурочной работы, сокращен на 95 %. Таким образом, годовой эффект от объединения четырех маршрутов в два сектора в данном примере можно оценить в 38 246,40 BYN. Предложен способ представления режимов сменности водителей, отличающийся предварительным выделением всех возможных неповторяющихся последовательностей серий рабочих смен (первая, вторая) и выходных дней, в виде буквенного (буквенно-цифрового) уникального кода и упорядочиванием их с формированием шаблонов графиков сменности, как своеобразных

типовых модулей, имеющих буквенное уникальное обозначение, и построенных по принципу гармонизации графика работ водителей, обеспечивающих не только соблюдение режимов труда и отдыха, но и равномерное распределение водителей по календарным дням месяца (с учетом неравномерности рабочие–выходные дни, первая–вторая смена и т. д.). Для комплектования сектора транспортными средствами и водителями определяется необходимое количество транспортных средств и водительских бригад (по критерию продолжительности рабочего цикла водителя), каждый сектор описывается условной формулой сектора, отражающей количество и тип сеток графика (например, 2A2B2C2D означает, что в секторе используется 8 маршрутных транспортных средств, при этом водители двух маршрутных транспортных средств работают по шаблону с кодом А, двух – В, двух – С, двух – D). Формула сектора составляется по принципу равенства количеств «каждого кода» сетки до достижения нужного количества транспортных средств (в случае, если количество транспортных средств не кратно 4 в случае вариантов А, В, С, D и не кратно 6 в случае вариантов Е, F, G, H, I, J, то используется чередование кодов «через один»). Подбор и расстановка водителей на каждое маршрутное транспортное средство в рамках каждого сектора осуществляются только в пределах сформированных формулой сектора сеток графика с учетом налагаемых ограничений (наличие допуска для работы на транспортных средствах, которыми должен быть укомплектован сектор, наличие допуска для работы на маршрутах сектора, в перспективе с учетом показателей рейтинга безопасности сектора, основанного на учете приведенного количества ДТП, произошедших на маршрутах сектора, с учетом показателей рейтинга профессиональной безопасности водителя и др.). Для реализации разработанной методики формирования секторов разработан алгоритм (укрупненный алгоритм приведен на рисунке 2) и компьютерная программа, существенно облегчающая внедрение секторального метода и его практическую реализацию. Разработанная компьютерная программа автоматизирует процессы трудоемких вычислений, а также предлагает варианты комплектования сектора транспортными средствами и водителями на основе автоматизированного проектирования режимов рабочего времени и отдыха водителя с учетом описанных условий и требований, что значительно снижает трудоемкость принятия решений и позволяет организо-

вызвать работу маршрутного пассажирского транспорта в условиях непрерывного совершенствования и оптимизации маршрутной сети и динамичного изменения объемов выполняемой транспортной работы.

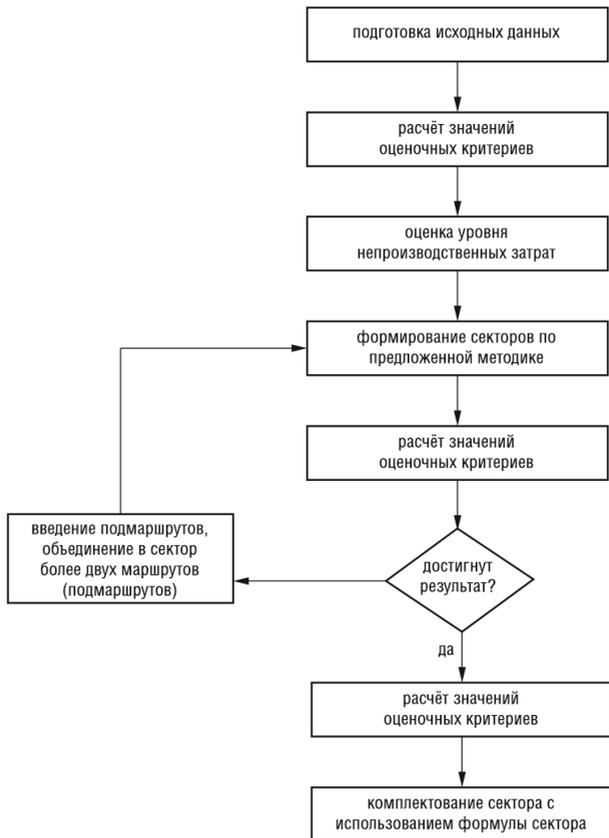


Рисунок 2 – Укрупненный алгоритм реализации разработанной методики

## Выводы

Разработаны новый метод и подходы, с помощью которых можно повысить эффективность маршрутного пассажирского транспорта за счет снижения непроизводственных затрат, а также улучшения качества его работы. Предложенная методика позволяет обеспечить равномерную производственную нагрузку, повысить рентабельность

предприятий маршрутного пассажирского транспорта, улучшить качество организации и управления перевозочными процессами, опосредованно повышает безопасность движения за счет гарантированного обеспечения режимов труда и отдыха, а также уменьшения «накопленной монотонности» и повышения информированности и осведомлённости о дорожно-транспортных ситуациях. Разработанный секторальный метод применим для организации работы маршрутного пассажирского транспорта и внедрен в г. Минске на пяти предприятиях маршрутного пассажирского транспорта крупнейшего перевозчика Беларуси, что подтверждается десятью актами внедрения в производство, отражающими практическую значимость исследования.

Стоит отметить, что секторальный метод можно применять не только для организации работы водителей с использованием существующего расписания движения, но и на этапе составления самого расписания движения и его оптимизации. Поэтому дальнейшее развитие применения метода видится за счет использования его при составлении расписания движения, что в свою очередь повысит эксплуатационную скорость, при определенных условиях обеспечит нужный интервал движения без увеличения стоянок между смежными рейсами.

## Литература

1. Зильберталь, А. Х. Проблемы городского пассажирского транспорта. – М.-Л. : Гострансиздат, 1937. – 272 с.
2. Гудков, В. А. Пассажи́рские автомоби́льные перевозки / В. А. Гудков, Л. Б. Миротин, А. В. Вельможин, С. А. Ширяев. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2004. – 447 с.
3. Спирин, И. В. Организация и управление пассажирскими автомобильными перевозками / И. В. Спирин. – М. : Издательский центр «Академия», 2003. – 400 с.
4. Седюкевич, В. Н. Коэффициент использования пассажироместимости транспортных средств как показатель оценки эффективности и качества перевозок / В. Н. Седюкевич, С. П. Якубович // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 16-й МНПК. – Минск : БНТУ, 2018. – Т. 3. – С 111.
5. Скирко́вский, С. В. Организация перевозок пассажиров с обособлением параметров системы городского маршрутизированного

транспорта : автореферат диссертации канд. техн. наук : 05.22.10 / С. В. Скирковский; БНТУ. – Минск, 2018. – 21 с.

6. Правила Технической Эксплуатации Трамвая. – Минск : Белинкоммаш, 1996. – 100 с.

7. Правила Технической Эксплуатации Троллейбуса. – Минск : Белинкоммаш, 1996. – 80 с.

8. Dennis Huisman, Richard Freling, Albert P. M. Wagelmans, Multiple-Depot Integrated Vehicle and Crew Scheduling / Dennis Huisman, Richard Freling, Albert P. M. Wagelmans, // Transportation Science 39(4). – Catonsville: Informs, 2005. – P. 491–502.

9. Schneider Lars, Betriebsplanung im öffentlichen Personennahverkehr Ziele, Methoden, Konzepte / Lars Schneider. – Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. – 193 с.

10. Зак, Ю. А. Прикладные задачи теории расписаний и маршрутизации перевозок. – М. : Книжный дом «Либроком», 2018. – 394 с.

11. Выбор формы учета рабочего времени водителей маршрутного пассажирского транспорта / Д. В. Капский, Е. Н. Кот, С. С. Семченков // Автотракторостроение и автомобильный транспорт: сборник научных трудов / Белорусский национальный технический университет; редкол.е: отв. ред. Д. В. Капский [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – Т. 2. – С 105–109.

12. Кузнецов, А. В., Холод, Н. И., Костевич, Л. С. Руководство к решению задач по математическому программированию. – Мн. : Вышэйшая школа, 1978. – 256 с.

Статья поступила 03.12.2021

Научное издание

**ТРАНСПОРТ И ТРАНСПОРТНЫЕ  
СИСТЕМЫ:  
конструирование, эксплуатация, технологии**

Сборник научных статей

Основан в 2018 году

Выпуск 3

Подписано в печать 13.12.2021. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 10,81. Уч.-изд. л. 8,46. Тираж 100. Заказ 763.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.