Грузовик

1
2018

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Учредитель ООО "Научно-техническое издательство "Инновационное машиностроение"
Главный редактор С.Н. ПЕДЕНКО

Редакционный совет

Д.Х. Валеев, д-р техн.наук
В.А. Волчков
С.М. Гайдар, д-р техн.наук
Л.В. Грехов, д-р техн.наук, проф.
В.А. Зорин, д-р техн.наук
В.В. Комаров, канд.техн.наук
В.А. Марков, д-р техн.наук, проф.
А.Н. Ременцов, д-р пед.наук, канд.техн.наук
О.Н. Румянцева, ген.дир.ООО "Издательство "Инновационное машиностроение"
А.Ф. Синельников, канд.техн.наук, проф.
А.А. Солнцев, д-р техн.наук
В.С. Устименко, канд.техн.наук
Х.А. Фасхиев, д-р техн.наук, проф.
Н.Д. Чайнов, д-р техн.наук, проф.

Корпункт:
Я.Е.Карповский (г.Минск)

Адрес редакции:
107076, Москва, Колодезный пер., дом 2-а, стр.12
Тел.(499) 269-48-96
E-mail: gruzovik@mashin.ru; http://www.mashin.ru

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

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).
Регистрационный номер ПИ № ФС77-63955 от 09.12.2015 г.

Подписной индекс:
по объединенному каталогу
"Пресса России" 39799

ООО «Издательство «Инновационное машиностроение», "Грузовик", 2018

Перепечатка материалов из журнала «Грузовик» возможна при обязательном письменном согласовании с редакцией журнала. При перепечатке материалов ссылка на журнал «Грузовик» обязательна.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

В НОМЕРЕ:

Конструкция

3 *Котов И. И., Зиятдинов А. А., Башегуров С. В.* Системы предотвращения и блокировки складывания автопоезда

8 *Тарасик В. П.* Частотные характеристики мехатронной системы управления фрикционами переключения передач автоматической трансмиссии автомобиля

Исследования. Расчет

18 *Жедь О. В., Копылов В. В.* Влияние формы отверстия зубчатого венца на его предварительное напряженное состояние при сборке с базовой деталью. Часть 2

23 *Копотилов В. И.* Классификация режимов движения автомобильного колеса

28 *Антипенко В. С., Афанасьев С. Г., Строев А. А.* Влияние эрозионной стойкости вольфрамовых высоконагруженных электродов на их свойства

Городской пассажирский наземный транспорт

35 *Кудряшов М. А., Маслова Л. Ю.* Взаимодействие автотранспорта (личного и общего пользования) в транспортно-пересадочных узлах

Практика

43 *Дунин А. Ю.* Способ управления формой дифференциальной характеристики впрыскивания воздействием на электромагнитный клапан форсунки

Журнал входит в Перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней http://perechen.vak2.ed.gov.ru/
Система Российского индекса научного цитирования www.elibrary.ru.
Пятилетний импакт-фактор РИНЦ 2015 г.— 0,208.
Место в рейтинге SCIENCE INDEX за 2014 г.по тематике "Транспорт" — 11; по тематике "Машиностроение" — 44. http://elibrary.ru/title_about.asp?id=9777

Информация на сайте "Autotransportnik.ru"

Truck

1
2018

SCIENTIFIC-TECHNICAL AND INDUSTRIAL MAGAZINE

Founder JSC Scientific and Technical Publishing House "Innovative Engineering"
Editor-in-Chief S.N. PEDENKO

Editorial council

D.Kh. Valeev, dr.en.s.
V.A. Volchkov
S.M. Gaydar, dr.en.s., prof,
L.V. Grekhov, dr.en.s., prof.
V.A. Zorin, dr.en.s.
V.V. Komarov, PhD in en.s.
V.A. Markov, dr.en.s., prof.
A.N. Rementsov, dr.Hab, PhD in en.s.
O.N. Rumyantseva, General Director, JSC "Publisher "Innovative Engineering"
A.F. Sinel'nikov, PhD in en.s., prof.
A.A. Solntsev, dr.en.s.
V.S. Ustimenko, PhD in en.s.
Kh.A. Faskhiev, dr.en.s., prof.
N.D. Chaynov, dr.en.s., prof.

Correspondent's office:
Ya.E. Karpovsky (Minsk)

Address of the editorial office:
107076, Moscow, Kolodezny Lane, house 2-a, str. 12
Ph. (499) 269-48-96
E-mail: gruzovik@mashin.ru; snp748@yandex.ru
http://www.mashin.ru

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

The magazine is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications (Roskomnadzor).
Registration number PI number FS77.-63955 on December 9, 2015

Subscription index:
according to the integrated catalog "Press of Russia" 39799

JSC Innovatsionnoye mashinostroyeniye Publishing House, "Truck", 2018

The reprint of materials from the "Truck" magazine is possible at obligatory written coordination with editorial office of the magazine. At the link to the "Truck" magazine is obligatory for a reprint of materials.

For contents of advertizing materials responsibility is born by the advertiser.

CONTENTS:

Design

3 *Kotov I. I., Ziyatdinov A. A., Bashegurov S. V.* Failure prevention and blocking systems

8 *Tarasik V. P.* Frequency characteristics of the mechatronic control system of gear shift clutch of automobile automatic transmission

Research. Calculation

18 *Zhed O. V., Kopylov V. V.* Influence of the form holes face on his prior stress state in the Assembly with the base detail. Part 2

23 *Kopotilov V. I.* Classification of modes of automobile wheel movement

28 *Antipenko V. S., Afanasiev S. G., Stroev A. A.* Influence of erosion stability of tungsten electrodes on their properties

Public passenger land transport

35 *Kudryashov M. A., Maslova L. Yu.* Interaction of private and public transport in hubs

Practice

43 *Dunin A. U.* The method of injection rate shaping by acting upon control valve of common rail injector

The journal is included in the list approved by the WAC RF publishers for publications of papers candidates degrees http://perechen.vak2.ed.gov.ru/
System of Russian Science Citation Index www.elibrary.ru.
Five-year impact factor INDEX 2015 — 0.208.
Place in rating of SCIENCE INDEX for 2014, on the theme "Transport" — 11; on the theme of "Engineering" is 44.
http://elibrary.ru/title_about.asp?id=9777
Information on the site "Autotransportnik.ru"

УДК 629.067/629.014/629.1-4/629.113

И. И. Котов, инженер-конструктор, **А. А. Зиятдинов,** начальник конструкторского бюро,
С. В. Башегуров, начальник бюро испытаний, НТЦ ПАО "КАМАЗ"
E-mail: Ilya.Kotov@kamaz.ru

СИСТЕМЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ И БЛОКИРОВКИ СКЛАДЫВАНИЯ АВТОПОЕЗДА

В данной статье описан один из элементов активной безопасности при эксплуатации автопоездов. Представлен небольшой обзор принципа действия разных схем предотвращения складывания тягача с полуприцепом, а также конструктивно-функциональные возможности, некоторые недостатки и преимущества. Рассмотрена новая и одна из последних систем реализации блокировки складывания безрельсового автопоезда с полуприцепом.

Ключевые слова: *безопасность при эксплуатации автопоезда, активная безопасность, система предотвращения и блокировки складывания полуприцепа, тягача, безрельсового автопоезда, прицепа.*

This article describes one of the elements of active safety in the operation of road trains. A brief review of the principle of the operation of various schemes for preventing the folding of a tractor with a semitrailer is presented, as well as structural and functional capabilities, some disadvantages and advantages. A new and one of the last systems for the implementation of the locking of the folding of a trackless vehicle with a semitrailer is considered.

Keywords: *safety during the operation of the road train, active safety, the system for preventing and blocking the folding of the semi-trailer, tractor, trackless trailer, trailer.*

Современный автомобиль по своей природе представляет собой устройство повышенной опасности. Учитывая социальную значимость автомобиля и его потенциальную опасность при эксплуатации, производители оснащают свои автомобили средствами, способствующими его безопасной эксплуатации. Сегодняшние автомобили сочетают в себе элементы как пассивной, так и активной безопасности. Пассивная безопасность автомобиля направлена на снижение или полное предотвращение вредных последствий, оказываемых на человека после аварии.

Активная безопасность — это совокупность конструктивных и эксплуатационных свойств автомобиля, направленных на предотвращение дорожно-транспортных происшествий и исключение предпосылок их возникновения, связанных с конструктивными особенностями автомобиля.

Если говорить проще, то это те системы автомобиля, которые помогают в предотвращении его аварии.

В этой статье описывается один из элементов активной безопасности, применяемый в безрельсовых автопоездах, состоящих из тягача и полуприцепа. Речь пойдет о системе предотвращения и блокировки складывания автопоезда, которая, в частности, может относиться к прицепам в составе сочлененного транспортного средства. Помимо повышения активной безопасности при некоторых компоновках система также направлена на снижение последствий при дорожно-транспортном происшествии, т. е. на повышение пассивной безопасности вследствие улучшения курсовой устойчивости автопоезда в целом. Автопоезд может остаться на проезжей части не сложенный и, даже может быть, стоя на колесах, а не в кювете на боку, с поврежденной кабиной тягача.

Явление складывания автопоезда может проявляться при разных условиях и по разным причинам. Самыми распространенными из них являются разность тормозных усилий, приходящихся на колеса тягача и полуприцепа; разность дорожного покрытия; неблагоприятные климатические условия, следствием которых является скользкое или мокрое полотно дороги.

Поэтому целью описываемого изобретения является повышение безопасности при эксплуатации транспортных средств путем исключения или остановки процесса складывания звеньев автопоездов, а также уменьшения опасных последствий заноса полуприцепа вследствие его удержания и

gz118.indd 3 20.12.2017 8:26:42

последующего выравнивания относительно направления движения.

Известны несколько схем реализации блокировки складывания автопоезда. Одни из них можно описать по входящим составным элементам и их принципу действия следующим образом.

1. Известен механизм (см. патент SU № 1558759, B62D 53/08, опубликован в 1971 г.), который включает в себя тормозной диск, установленный на оси шкворня. Вся конструкция напоминает собой тормозной диск колеса с суппортом, только в данном случае осью является ось проворачивания полуприцепа относительно тягача. Система приостанавливает или полностью блокирует проворачивание полуприцепа относительно тягача или тормозного диска посредством суппорта, управляемым бортовым компьютером, который учитывает сигналы от колесной тормозной системы и других датчиков. Конструкция относительно компактна, так как все элементы располагаются практически над седлом тягача. Но и достаточно сложна, так как включает в себя шарнирно-опорные сопряжения, имеющие ограниченный срок службы. К тому же часть конструкции занимает пространство полуприцепа, что может сказаться на эксплуатационных качествах автопоезда.

2. Другая система — это конструкция, включающая в себя гибкий элемент (тягу) и пружинный элемент, последовательно соединенные от тягача до задней части рамы полуприцепа с наличием промежуточной блокировки их перемещения — стопорным механизмом фиксации тяги, связанным с тормозной системой (см. патент SU № 1654100, B62D 53/06, опубликован в 1969 г.). Срабатывание блокировки механизма может осуществляться посредством тормозной системы вследствие наличия связи с ней. Принцип основан на контроле изменения длины и блокировки перемещения гибкого элемента и пружины на участке от тягача до противоположного крепления звена к полуприцепу из-за геометрических особенностей при складывании автопоезда. Все элементы в данном случае скрыты под рамой полуприцепа, что повышает эксплуатационные свойства автомобиля.

Недостатком устройства является то, что оно работает только в режиме торможения автопоезда (при фиксации гибкого элемента). Кроме того, устройство не обеспечивает возможности исправления ситуации, когда складывание тягача и полуприцепа уже произошло.

3. Еще одна система (см. патент РФ № 2175927, МПК7 B62D 53/04, опубликован 20.11.2001 г.), включающая в себя комбинированный механизм с использованием гибкого и пружинного элемента (описанные в предыдущем случае) с дополнительным цилиндром со штоком, которые соединены с тормозной системой. Шток цилиндра выравнивает полуприцеп посредством воздействия на гибкий элемент при складывании.

Заявленным изобретением решается задача повышения эксплуатационных характеристик автопоезда путем регулирования взаимного положения его составных частей как для оперативного изменения (увеличения) сцепного веса тягача, например, при буксовании, подъеме, спуске, так и для предупреждения и устранения уже случившегося складывания тягача и полуприцепа.

Заявленное устройство содержит несложную схему по числу элементов, их конструктивному выполнению, а также взаимосвязи между собой. Устройство регулирует взаимное положение тягача и полуприцепа, и при этом обеспечивает автопоезду высокую надежность в работе — повышение проходимости и производительности вследствие исключения буксования и складывания автопоезда. Также повышается безопасность при работе таких автопоездов на трассе, поскольку практически исключаются несчастные случаи (нет опрокидывания, заносов полуприцепов и т. д.).

4. Существует система (см. патент SU № 1348255, B62P 53/00, опубликован в 1973 г.) с двумя барабанами, соединенными между собой цепью. Один из барабанов располагается на вертикально закрепленной оси на нижней стороне рамы полуприцепа. На барабанах есть зубчатые венцы для осуществления цепной связи с осью шкворня через зубчатый венец второго барабана, располагаемого над седлом тягача. При складывании полуприцепа барабан, находящийся под полуприцепом, автоматически проворачивается благодаря цепной связи с тягачом. Происходящее складывание считывает угловой датчик перемещения, который направляет исполнительный импульс к устройству затормаживания барабана для предотвращения бокового смещения полуприцепа. Датчик срабатывает только при наличии торможения колесной системы. Усилие торможения барабана пропорционально усилию затормаживания колес и отрегулировано так, что предотвращает виляние полуприцепа. При обычном маневрировании полуприцеп беспрепятственно перемещается на необходимый угол относительно тягача.

Преимуществом данной системы является то, что в ней есть дополнительный тумблер, который

gz118.indd 4 20.12.2017 8:26:42

позволяет намеренно блокировать перемещение барабана полуприцепа при движении задним ходом, что исключает складывание автопоезда.

5. Другое устройство для предотвращения складывания автопоезда, состоящего как обычно из тягача, снабженного пневмотормозной системой и седельным устройством, взаимодействует со шкворнем, жестко закрепленным на раме полуприцепа, имеющего также пневмотормозную систему, соединенную с тормозной системой тягача. Рама полуприцепа шарнирно соединена со штоком пневмоцилиндра, расположенного соосно его продольной оси. Пневмоцилиндр шарнирно закреплен на шкворне, подвижно размещенном в направляющих рамы полуприцепа и подпружиненным относительно последней, причем подпоршневая полость цилиндра, расположенная со стороны шкворня, подключена с помощью трубопровода к пневмотормозной системе полуприцепа (см. патент РФ № 2255018, МПК B62D 53/04, опубликован 27.06.2005 г.).

В момент резкого торможения под действием силы инерции шкворень начинает перемещаться в пазу седла вперед, деформируя пружину сжатия устройства, одновременно увлекая за собой по этой же стрелке цилиндр. В этот момент происходит регулирование тормозного усилия на колесах полуприцепа, что и предотвращает складывание.

При отсутствии складывания автопоезда рабочая тормозная система автопоезда переходит в штатный режим.

6. Следующая система автопоезда (см. патент РФ № 2255017, МПК B62D 53/04, опубликован 27.06.2005 г.), также взаимосвязана с полуприцепом с помощью шкворня, жестко закрепленного на опорном листе уступа рамы полуприцепа. От предыдущей конструкции она отличается тем, что шкворень выполнен пустотелым. В нем размещен запорный клапан и с одной стороны он герметично примыкает к подпружиненному относительно седла седельного устройства стакану, также снабженному запорным клапаном и подключенному с помощью трубопровода к воздушному баллону полуприцепа, а с другой — к массивному, подпружиненному к раме полуприцепа, ползуну, снабженному пазом полуэллиптической формы с присоединенным к нему гибким трубопроводом. Тот, в свою очередь, подключен к трубопроводам тормозных камер колес полуприцепа. Причем подпружиненный ползун связан со штоком пневмоцилиндра, корпус которого присоединен к раме полуприцепа, и его полость также при помощи трубопровода соединена с трубопроводами упомянутых тормозных камер колес полуприцепа.

Здесь предотвращение складывания регулируется тормозным усилием на колесах полуприцепа посредством воздействия инерционных моментов на шкворень и перепускные клапаны тормозной системы.

Недостатки двух последних технических решений заключаются в сложности конструкции, так как кроме подвода сигнала требуется подвод энергии сжатого воздуха из пневмосистемы тормозов автомобиля, т. е. при эксплуатации автопоезда с данным конструктивным решением возможно снижение надежности тормозной системы самого автомобиля вследствие утечки сжатого воздуха в соединениях предлагаемой системы. Помимо этого техническое решение взаимосвязано с устройством шкворня полуприцепа — ответственного элемента в сцепке автопоезда (возможно его ослабление, а седло седельно-сцепного устройства обычно стандартизовано по размеру паза под шкворень).

Данная конструкция не предусматривает ее применения при иных условиях эксплуатации автопоезда, например, при движении автопоезда по мокрому или обледеневшему дорожному полотну, когда снижено или непостоянно сцепление шин колес тягача автопоезда с дорожным покрытием.

7. Одна из последних систем блокировки складывания автопоезда (см. патент РФ № 166072, МПК B62D 53/04, опубликован 10.11.2016 г.) позволяет использовать автопоезд в составе автомобиля с полуприцепом в более широких условиях эксплуатации. Поэтому данную схему рассмотрим более подробно.

Система блокировки складывания автопоезда (тягач снабжен седельно-сцепным устройством, взаимодействующим со шкворнем, жестко закрепленным на раме полуприцепа) отличается от предыдущих конструктивных решений тем, что содержит два гидроцилиндра, дополнительно установленные по бортам полуприцепа параллельно продольной оси. Они оснащены блоками на концах штоков, трубопроводы, соединяющие поршневые и штоковые полости гидроцилиндров, направляющий диск, шарнирно установленный на шкворне полуприцепа, электромагнитный клапан, связанный с электронным блоком управления автомобиля и установленный на трубопроводе, соединяющем поршневые полости гидроцилиндров, металлический канат, прикрепленный в одной точке к направляющему диску со стороны передней части полуприцепа, и свя-

gz118.indd 5 20.12.2017 8:26:42

занный с полуприцепом через блоки на штоках гидроцилиндров и огибающий направляющий диск. Конструкцией предусмотрена возможность фиксации направляющего диска относительно седельного устройства при стыковке полуприцепа с тягачом.

Положениями штоков гидроцилиндров с блоками по сигналам электронного блока управляет электромагнитный клапан, установленный на трубопроводе, соединяющем штоковые полости гидроцилиндра. Та, в свою очередь, воздействует на металлический канат (его концы закреплены на полуприцепе), пропущенный через направляющий диск, шарнирно установленный на шкворне полуприцепа.

Конструктивно предусмотрена фиксация направляющего диска относительно седельного устройства при стыковке полуприцепа с тягачом, а управление системой блокирования складывания автопоезда может осуществляться электронным блоком управления автомобиля или в ручном режиме. Это позволяет повысить надежность и безопасность эксплуатации автопоезда, состоящего из тягача и полуприцепом путем предотвращения складывания автопоезда в процессе торможения или при движении в условиях снижения или непостоянного сцепления шин с дорожным покрытием.

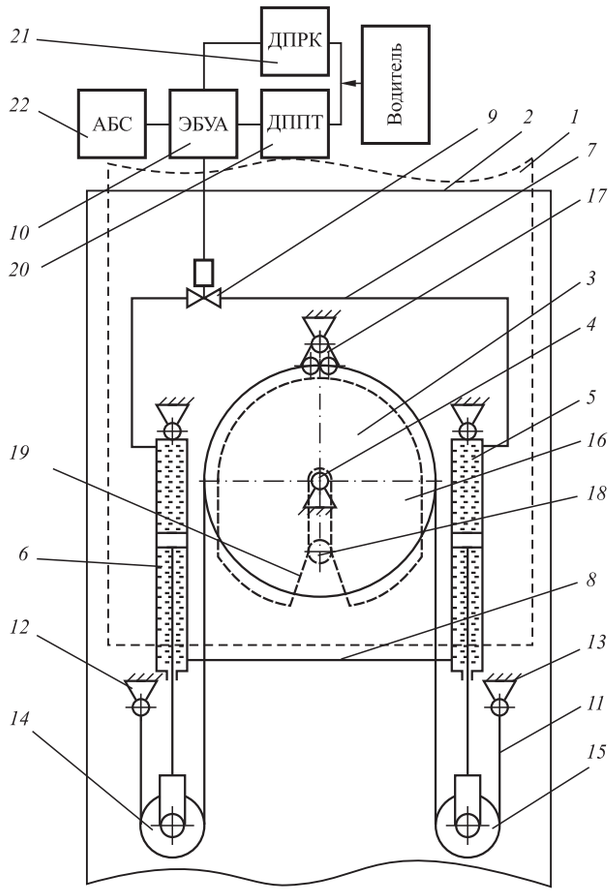
Данное устройство отличается простотой и надежностью, так как требует для срабатывания только поступления сигнала на электромагнитный клапан системы. Причем сам сигнал может быть зависим от особенностей процесса торможения автопоезда, а также им можно управлять принудительно — из кабины водителя для постоянной ручной блокировки от поворота полуприцепа, например, на стоянке.

Конструкция рассматриваемого устройства не связана с пневматической тормозной системой автопоезда и не влияет на надежность шкворня полуприцепа. При этом соблюдена возможность гибкой эксплуатации автопоезда: устройство не только предотвращает складывание автопоезда при резком торможении, но и реагирует на движение по скользкой дороге в дождь и гололед.

Схема устройства системы блокировки складывания автопоезда показана на рисунке. Седельный тягач *1* связан с полуприцепом *2* через свободную кинематическую связь седельно-сцепного устройства *3* со шкворнем *4*. Для управления положением седельного тягача *1* относительно оси шкворня *4* полуприцепа имеющаяся кинематическая связь дополнительно оснащается механизмом блокировки складывания автопоезда с автоматической системой управления.

Механизм блокировки складывания автопоезда включает в себя взаимосвязанные замкнутые гидравлическую систему и кинематическую цепь. Гидравлическая система заполняется жидкостью с малой вязкостью, работающей в широком температурном диапазоне. Она состоит из гидроцилиндров *5*, *6*, закрепленных вдоль бортов полуприцепа параллельно продольной оси. Штоковые полости этих гидроцилиндров соединены между собой трубопроводами *7*, *8*. Они подобраны таким образом, чтобы обеспечить наименьшее сопротивление при перетекании жидкости. На трубопроводе *7*, соединяющем штоковые полости гидроцилиндров *5*, *6*, установлен электромагнитный клапан *9*, связанный с электронным блоком управления *10* автомобиля.

Кинематическая цепь построена на гибкой связи металлического каната *11*, дополнительно, помимо седельно-сцепного устройства *3*, связы-



Схематичное изображение устройства системы блокировки складывания автопоезда

gz118.indd 6 20.12.2017 8:26:42

вающего тягач *1* с полуприцепом *2*. На концах металлического каната *11* имеются петлеобразные заделки *12*, *13*, прикрепленные к раме полуприцепа. Специальные опоры *12* и *13* позволяют проводить натяжение металлического каната *11* при установке и регулировке механизма системы блокировки складывания автопоезда.

Металлический канат *11* пропущен через промежуточные роликовые опоры *14*, *15*, закрепленные на концах штоков гидроцилиндров *5*, *6*. Направляющий диск *16* шарнирно установлен на шкворне *4* полуприцепа *2* и имеет возможность фиксировать седельно-сцепное устройство *3* от поворота относительно тягача *1*.

Фиксация может быть достигнута либо при помощи крепления направляющего диска *16* к передней части седла при помощи кронштейна-серьги *17* после стыковки полуприцепа с седельным тягачом, либо наличием в конструкции направляющего диска *16* цапфы *18*, которая входит в паз *19* седельно-сцепного устройства *3* при стыковке полуприцепа с тягачом *1*.

Работа системы происходит следующим образом. При повороте тягача *1* относительно полуприцепа *2*, например, влево, происходит воздействие кинематической цепи на гидроцилиндры *5*, *6*. Штоки и поршни гидроцилиндров *5*, *6* перемещаются к оси полуприцепа. При этом происходит циркуляция жидкости из одного гидроцилиндра в другой. Таким образом, осуществляется относительно свободное взаимодействие штоковых полостей гидроцилиндров *5*, *6* в замкнутой гидросистеме. Ход поршней гидроцилиндров отрегулирован так, чтобы обеспечить максимально допустимый угол поворота полуприцепа *2* относительно тягача *1*. Это необходимо для удовлетворительного маневрирования автопоезда, в том числе и при развороте автопоезда.

Если необходимо блокировать положение тягача *1* относительно полуприцепа *2* (или при принудительной блокировке), подается сигнал на электромагнитный клапан *9*, который изменяет проходное сечение трубопровода *7* вплоть до полного его перекрытия. При этом блокированные гидроцилиндры *5*, *6*, вследствие неподвижности поршня и штока, через металлический канат *11* препятствуют повороту полуприцепа *2* относительно тягача *1*, не давая складываться автопоезду.

Для безопасного движения автопоезда в различных эксплуатационных условиях возникает необходимость блокировки положения полуприцепа и тягача в горизонтальной плоскости относительно оси шкворня *4*.

Задача по блокировке составных частей автопоезда решается тем, что при подаче сигнала на электромагнитный клапан *9*, свободное перетекание жидкости в гидравлической системе невозможно. Штоки гидроцилиндров *5*, 6 при этом не перемещаются. Металлический канат *11* также не имеет свободы перемещения и не позволяет полуприцепу *2* поворачиваться по отношению к тягачу *1*. Или наоборот, относительно оси сцепки, проходящей через ось шкворня *4*.

При повороте элементов автопоезда по отношению друг к другу относительно оси шкворня *4* происходит вынужденное перемещение поршней гидроцилиндров *5*, *6* посредством связанных между собой штоковых полостей, а также металлического каната *11*. При срабатывании электромагнитного клапана *9* поршни гидроцилиндров *5*, *6* блокируются и тем самым не дают возможности свободно перемещаться металлическому канату *11*, вызывая тем самым блокировку положения полуприцепа *2* относительно тягача *1*.

Электромагнитный клапан *9* при оптимальном движении автопоезда — нормально открыт, а при необходимости блокировки находится в задаваемом положении, препятствуя протоку жидкости в гидравлической системе. Ручную постоянную принудительную блокировку включает водитель: на панели приборов имеется клавиша "блокировка автопоезда".

Для автоматического управления системой электромагнитный клапан *9* связан с электронным блоком управления *10*, в котором формируется определенный вид сигнала. Для формирования выходного сигнала из электронного блока управления *10* на его вход поступает информация о действиях водителя: через датчик *20* о положении педали тормоза, через датчик *21* о положении рулевого колеса, а также о состоянии дорожного полотна от антиблокировочной и антипробуксовочной систем *22*.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Асриянц А. А., Хачатуров А. А., Яковлев Е. И.** Передаточные функции прицепов // Труды МАДИ. — 1973. — Вып. 68.
2. **Бахмутский М. М.** Исследование влияния конструктивных параметров прицепов на управляемость двухзвенных автопоездов: Дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. — М.: НАМИ, 1970.
3. **www1.fips.ru — ФИПС**
4. **http://www.findpatent.ru/**
5. **http://www.freepatent.ru/**

gz118.indd 7 20.12.2017 8:26:42

УДК 629.3

В. П. Тарасик, д-р техн. наук, профессор, Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Беларусь
E-mail: avtomobili@bru.by

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ФРИКЦИОНАМИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ПЕРЕДАЧ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ АВТОМОБИЛЯ

Изложена методика расчета частотных характеристик системы управления. Приведена структурная схема и передаточные функции компонентов системы. Рассмотрены способы частотного анализа и необходимые условия для их использования. Приведены графики частотных характеристик мехатронной системы управления фрикционами автоматической трансмиссии автомобиля.

Ключевые слова: *автоматическая трансмиссия, мехатронная система управления, фрикцион переключения передач, пропорциональный электромагнит, регулятор давления, передаточная функция, частотная характеристика.*

The methodology for calculating the frequency characteristics of the control system is described. The structural scheme and transfer functions of the system components are given. The methods of frequency analysis and the necessary conditions for their use are considered. The graphs of the frequency characteristics of the mechatronic control system of automobile automatic transmission clutch are given.

Keywords: *automatic transmission, mechatronic control system, gear shift clutch, proportional magnet, pressure regulator, transfer functions, frequency characteristic*

В Белорусско-Российском университете создана мехатронная система автоматического управления (МСАУ) фрикционами автомобильной гидромеханической передачи (ГМП), посредством которых осуществляется автоматическое переключение передач трансмиссии. Функциональная и принципиальная схемы МСАУ приведены в [1], где подробно рассмотрены структура системы, принципиальная схема и процесс функционирования. В [2] изложена методика проектирования этой системы.

Созданная МСАУ предназначена для управления процессом изменения давления в гидроцилиндре фрикциона и расходом рабочей жидкости, подаваемой в гидроцилиндр при включении и выключении фрикционов в процессе переключения передач [3]. Программа управления давлением и расходом жидкости формируется микропроцессорным контроллером ГМП в соответствии с заданным алгоритмом. Реализуемые характеристики управления давлением представлены в [4].

К системе управления фрикционами предъявляется комплекс требований по устойчивости и качеству процесса функционирования, характерных для любого автоматического устройства. МСАУ должна обеспечивать адекватное формирование управляющего давления на ее выходе, подаваемого в гидроцилиндр фрикциона. Переходные процессы функционирования механизмов МСАУ должны быстро затухать. Время переходного процесса $t_п$ и перерегулирование характеристик управления σ не должны превышать рекомендуемых нормативных значений. Высокое качество процесса регулирования давления должно обеспечиваться также при управляющих воздействиях на систему, формируемых ПИД-регулятором и поступающих в обмотку пропорционального электромагнита. Данные воздействия носят периодический характер, могут возбуждать вынужденные колебания механизмов МСАУ и нарушать процесс формирования характеристик управления. В этом случае необходимо обеспечить предотвращение возможности возникновения резонансных режимов колебаний.

Математическая модель МСАУ приведена в [1]. Она представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений (1). Нелинейности объекта исследования обусловлены наличием нелинейных функций формируемых давлений и характеристик пропорционального электромагнита, перекрытием дросселирующих щелей золотникового клапана, характеристикой сухого трения золотника, физическими свойствами регулируемых и нерегулируемых дросселей гидравлических

gz118.indd 8 20.12.2017 8:26:42

механизмов системы (местные нелинейные потери давления).

Результаты моделирования и оценки качества переходных процессов созданной системы управления изложены в [1], где приведены графики этих процессов при ступенчатом воздействии управляющего сигнала — напряжения на выходе ШИМ контроллера. Исследованы зависимости показателей качества (времени переходного процесса $t_п$ и перерегулирования σ) от основных параметров механизмов МСАУ (величины перекрытия дросселирующих щелей золотникового клапана, соотношения диаметров поясков золотника и диаметров дросселей обратной связи).

Важнейшим требованием к системе автоматического управления является обеспечение устойчивости ее функционирования в условиях непрерывно изменяющихся внешних возмущающих и управляющих воздействий. Устойчивость системы характеризует ее работоспособность, заключающуюся в свойстве удерживать управляемые параметры в заданных пределах на всех режимах работы управляемого объекта, без резких отклонений от заданных характеристик.

Цель исследования

Разработка методики определения амплитудно-частотных и фазово-частотных характеристик сложной нелинейной динамической системы и использование ее для оценки показателей качества и устойчивости процесса функционирования созданной мехатронной системы автоматического управления фрикционами гидромеханической передачи для карьерных самосвалов БелАЗ.

Методика исследования

Исследование качества и устойчивости процессов функционирования системы автоматического управления при периодическом характере изменения управляющих воздействий осуществляется частотными методами. В теории автоматического управления наиболее часто для этой цели используют годограф Найквиста и логарифмические частотные характеристики. Для их применения необходимо получить передаточную функцию разомкнутой системы управления, т. е. системы с отключенной обратной связью.

Передаточная функция может быть получена лишь для линейной динамической системы, описываемой линейными дифференциальными уравнениями. В случае нелинейных уравнений они подвергаются линеаризации. К линейным дифференциальным уравнениям применимо преобразование Лапласа, превращающее исходную систему дифференциальных уравнений в систему алгебраических уравнений с комплексными переменными.

Предположим, что на вход системы подается управляющее воздействие $q(t)$, а на ее выходе реализуется управляемый процесс $x(t)$. Для получения передаточной функции системы управления в этом случае, используя преобразование Лапласа, преобразуют функции $q(t)$ и $x(t)$ в функции $Q(s)$ и $X(s)$, аргументом которых вместо времени t будет комплексная переменная s. Функции $q(t)$ и $x(t)$ называют оригиналами, а $Q(s)$ и $X(s)$ — их изображениями по Лапласу.

Передаточной функцией $W_x^q(s)$ называется отношение лапласова изображения исследуемого процесса $X(s)$ к лапласову изображению воздействия на систему $Q(s)$ при нулевых начальных условиях

$$W_x^q(s) = X(s)/Q(s). \quad (1)$$

Передаточная функция представляет собой дробно-рациональную функцию комплексной переменной $s = \alpha + j\omega$ с постоянными коэффициентами. При частотном анализе динамической системы принимают $s = j\omega$:

$$W_x^q(j\omega) = X(j\omega)/Q(j\omega). \quad (2)$$

Комплексные функции $X(j\omega)$ и $Q(j\omega)$ называют частотными характеристиками соответственно исследуемого процесса и внешнего воздействия, а $W_x^q(j\omega)$ — комплексной частотной характеристикой системы (или сокращенно — частотной характеристикой). Частотную характеристику системы $W_x^q(j\omega)$ можно представить в виде:

$$W_x^q(j\omega) = U_x^q(\omega) + jV_x^q(\omega), \quad (3)$$

где $U_x^q(\omega) = ReW_x^q(j\omega)$ — вещественная частотная характеристика, соответствующая проекции вектора $W_x^q(j\omega)$ на вещественную ось Re комплексной плоскости; $V_x^q(\omega) = ImW_x^q(j\omega)$ — мнимая частотная характеристика, соответствующая проекции вектора на мнимую ось Im.

Модуль и аргумент частотной характеристики определяются по формулам:

$$A_x^q(\omega) = \sqrt{\left[U_x^q(\omega)\right]^2 + \left[V_x^q(\omega)\right]^2}; \quad (4)$$

$$\varphi_x^q(\omega) = \mathrm{arctg}\left[V_x^q(\omega)/U_x^q(\omega)\right]. \quad (5)$$

gz118.indd 9 20.12.2017 8:26:42

График зависимости $A_x^q = f(\omega)$ называют амплитудно-частотной характеристикой системы (АЧХ), а график зависимости $\varphi_x^q = f(\omega)$ — фазово-частотной характеристикой (ФЧХ). АЧХ и ФЧХ определяются в предположении, что воздействие $q(t)$ носит гармонический характер:

$$q(t) = A_q \sin(\omega t + \varphi_0), \tag{6}$$

где A_q — амплитуда воздействия; ω — круговая частота, рад/с; φ_0 — начальная фаза.

АЧХ характеризует зависимость величины отношения амплитуды A_x исследуемого процесса $x(t)$ к амплитуде A_q воздействия $q(t)$ от частоты ω, а ФЧХ — зависимость разности их фаз от частоты:

$$A_x^q(\omega) = A_x / A_q; \tag{7}$$

$$\varphi_x^q(\omega) = \varphi_x - \varphi_0. \tag{8}$$

Наиболее просто оценка устойчивости системы управления осуществляется методом логарифмических частотных характеристик. Поскольку математическая модель исследуемого объекта нелинейная, необходимо вначале произвести ее линеаризацию. Кроме того, следует учесть, что в данной системе имеются два типовых нелинейных элемента, отображающие физические свойства дросселирующих щелей золотникового клапана и сухого трения золотника (см. рис. 2 в [1]). Статические характеристики этих элементов показаны на рис. 1 (дросселирующих щелей — на рис. 1, *а*; сухого трения — на рис. 1, *б*). Для таких нелинейных элементов применяется метод гармонической линеаризации [5, 6]. Рассматриваемые нелинейности однозначные, без

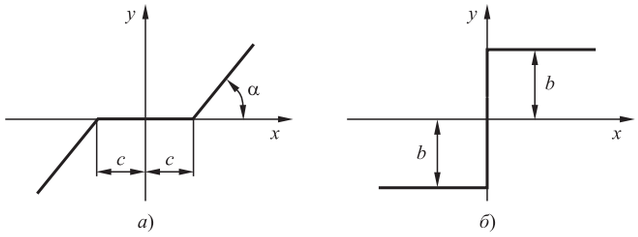


Рис. 1. Статические характеристики нелинейных элементов золотникового клапана МСАУ

гистерезисных петель. Коэффициент гармонической линеаризации элемента показан на рис. 1, *а*:

$$q_1(a) = \begin{cases} k - \dfrac{2k}{\pi}\left(\arcsin\dfrac{c}{a} + \dfrac{c}{a}\sqrt{1 - \dfrac{c^2}{a^2}}\right) & \text{при } a > c, \\ 0 & \text{при } a \leqslant c; \end{cases} \tag{9}$$

а на рис. 1, *б*:

$$q_2(a) = 4b/(\pi a), \tag{10}$$

где a — амплитуда сигнала на входе x элемента; k — коэффициент наклона характеристики: $k = \mathrm{tg}(\alpha)$.

Остальные параметры показаны на рис. 1, *а* и *б*.

Линеаризация нелинейных функций фазовых координат системы (характеристика давления регулятора $p_{\text{р.д}}$, характеристика пропорционального электромагнита, функции потерь давления на дросселях и в гидромагистрали) осуществлялась разложением в ряд Тейлора.

В результате получена линеаризованная математическая модель мехатронной системы управления фрикционами ГМП в следующем виде:

$$\left.\begin{aligned}
&dI_{\text{э.м}}/dt = (U - R_{\text{э.м}} I_{\text{э.м}})/L_{\text{э.м}};\\
&d\nu_{\text{я}}/dt = \begin{bmatrix} A_{\text{с}}(\bar{p}_{\text{р.д}} + dp_{\text{р.д}}(x_{\text{я}} - \bar{x}_{\text{я}}) - k_z \nu_{\text{зол}}) - A_{\text{э.м}} I_{\text{э.м}} - \\ -B_{\text{э.м}}(\bar{I}_{\text{э.м}} x_{\text{я}} + \bar{x}_{\text{я}}(I_{\text{э.м}} - \bar{I}_{\text{э.м}})) - \mu_{\text{я}} \nu_{\text{я}} \end{bmatrix} \Big/ m_{\text{я}};\\
&d\nu_{\text{зол}}/dt = \begin{bmatrix} A_{\text{б}}(\bar{p}_{\text{р.д}} + dp_{\text{р.д}}(x_{\text{я}} - \bar{x}_{\text{я}}) - k_z \nu_{\text{зол}}) - A_{\text{м}} p_{\text{вых}} - F_{\text{пр0}} - c_{\text{пр}} x_{\text{зол}} - \\ -2(A_{\text{б}} k_{\text{м.к}} + A_{\text{м}} k_{\text{о.с}})|\nu_{\text{зол}}|\nu_{\text{зол}} - \mu_{\text{зол}} \nu_{\text{зол}} - F_{\text{тр}} q_2(a) \end{bmatrix} \Big/ m_{\text{зол}};\\
&dQ_{\text{г.ц}}/dt = \left[p_{\text{вых}} - p_{\text{г.ц}} - \mu_{\text{г.л}} Q_{\text{г.ц}} - \mu_{\text{г.н}} |\bar{Q}_{\text{г.ц}}| \bar{Q}_{\text{г.ц}} - 2\mu_{\text{г.н}} |\bar{Q}_{\text{г.ц}}| (Q_{\text{г.ц}} - \bar{Q}_{\text{г.ц}})\right] \Big/ m_{\text{г.ц}};\\
&dp_{\text{г.ц}}/dt = c_{\text{г.ц}}(Q_{\text{г.ц}} - Q_{\text{ут}});\\
&dp_{\text{вых}}/dt = c_{\text{вых}}(Q_{\text{щ}} + A_{\text{м}} v_{\text{зол}} - Q_{\text{г.ц}});\\
&dx_{\text{я}}/dt = \nu_{\text{я}};\\
&dx_{\text{зол}}/dt = \nu_{\text{зол}}.
\end{aligned}\right\} \tag{11}$$

gz118.indd 10 20.12.2017 8:26:43

Расшифровка обозначений фазовых координат и параметров уравнений (11) дана в [1]. Значения координат $\bar{x}_я$, $\bar{I}_{э.м}$, $\bar{Q}_{г.ц}$, параметра $F_{пр0}$ и характеристики давления регулятора $\bar{p}_{р.д}$ соответствуют исходному статическому состоянию системы. Для исключения их из уравнений (11) продифференцируем уравнения (2)—(4) по времени, подставляя при этом значения производных $dx_я/dt$, $dx_{зол}/dt$ и $dp_{г.ц}/dt$, и применим к полученным линейным уравнениям преобразование Лапласа. В результате получаем искомые выражения передаточных функций системы управления:

$$W_{I_{э.м}}^{U}(s) = \frac{I_{э.м}(s)}{U(s)} = \frac{k_1}{T_{э.м}s+1}; \quad (12)$$

$$W_{v_я}^{I_{э.м},v_{зол}}(s) = -\frac{v_я(s)}{I_{э.м}(s)} - \frac{v_я(s)}{v_{зол}(s)} = -\frac{k_2 s + k_3 s}{T_я^2 s^2 + 2\xi_я T_я s + 1}; \quad (13)$$

$$W_{v_{зол}}^{v_я,p_{вых},F_{тр}}(s) = \frac{v_{зол}(s)}{v_я(s)} - \frac{v_{зол}(s)}{p_{вых}(s)} - \frac{v_{зол}(s)}{f(F_{тр})} = \frac{k_4 - k_5 s - k_6 q_2(a)s}{T_{зол}^2 s^2 + 2\xi_{зол}T_{зол}s + 1}; \quad (14)$$

$$W_{Q_{г.ц}}^{p_{вых}}(s) = \frac{Q_{г.ц}(s)}{p_{вых}(s)} = \frac{k_{10}s}{T_{г.ц}^2 s^2 + 2\xi_{г.ц}T_{г.ц}s + 1}; \quad (15)$$

$$W_{p_{вых}}^{v_{зол},x_{зол},Q_{г.ц}}(s) = \frac{p_{вых}(s)}{v_{зол}(s)} + \frac{p_{вых}(s)}{x_{зол}(s)} - \frac{p_{вых}(s)}{Q_{г.ц}(s)} = \frac{k_7 + k_8 + k_9}{s}, \quad (16)$$

где $T_{э.м}$, $T_я$, $T_{зол}$, $T_{г.ц}$ — постоянные времени, характеризующие инерционные свойства соответственно обмотки электромагнита, его якоря, золотника и поршня гидроцилиндра фрикциона с учетом массы рабочей жидкости в гидромагистрали, с; $\xi_я$, $\xi_{зол}$, $\xi_{г.ц}$ — относительные коэффициенты затухания колебаний якоря, золотника и рабочей жидкости.

Для вычисления постоянных времени инерционных звеньев получены следующие выражения: $T_{э.м} = L_{э.м}/R_{э.м}$; $T_я = \sqrt{m_я/\left(B_{э.м}I_{э.м} - A_с\,\partial p_{р.д}/\partial x_я\right)}$; $T_{зол} = \sqrt{m_{зол}/c_{пр}}$; $T_{г.ц} = \sqrt{m_{г.ц}/c_{г.ц}}$. Значения этих параметров для исследуемой МСАУ: $T_{э.м} = 1{,}7647\cdot10^{-3}$; $T_я = 3{,}4872\cdot10^{-4}$; $T_{зол} = 6{,}1457\cdot10^{-3}$; $T_{г.ц} = 6{,}3752\cdot10^{-4}$. Очевидно, что система управления характеризуется малой инерционностью, следовательно, обладает высоким быстродействием.

На основе полученных передаточных функций составляется структурная алгоритмическая схема системы управления. Согласно выражениям (12)—(16) структурная схема содержит одно апериодическое звено (12), три колебательных звена (13)—(15) и одно интегрирующее звено (16). Апериодическое звено отображает физические свойства пропорционального электромагнита, колебательные звенья — соответственно якоря электромагнита, золотникового клапана и гидросистемы привода гидроцилиндра фрикциона, а интегрирующее — запорно-регулирующего органа золотникового клапана [1].

Параметры $k_1...k_{10}$ представляют собой коэффициенты передачи, характеризующие соотношения между соответствующими сигналами на входе и выходе звеньев. Выражения для вычисления этих коэффициентов легко составляются на основе используемой линеаризованной системы дифференциальных уравнений:

$$k_1 = 1/R_{э.м};$$

$$k_2 = \left(A_{э.м} + B_{э.м}\bar{x}_я\right)\Big/\left(B_{э.м}\bar{I}_{э.м} - A_с dp_{р.д}\right);$$

$$k_3 = A_с k_z\Big/\left(B_{э.м}\bar{I}_{э.м} - A_с dp_{р.д}\right);$$

$$k_4 = A_б dp_{р.д}/c_{пр};\ k_5 = A_м/c_{пр};\ k_6 = F_{тр}/c_{пр};$$

$$k_7 = A_м c_{вых};\ k_8 = k_Q c_{вых};\ k_9 = c_{вых};\ k_{10} = 1/c_{г.ц}.$$

Введем следующие обозначения основных звеньев структурной схемы системы управления:

$$W_{э.м}(s) = k_1/(T_{э.м}s+1); \quad (17)$$

$$W_я(s) = 1\Big/\left(T_я^2 s^2 + 2\xi_я T_я + 1\right); \quad (18)$$

$$W_{зол}(s) = 1\Big/\left(T_{зол}^2 s^2 + 2\xi_{зол}T_{зол} + 1\right); \quad (19)$$

$$W_{г.ц}(s) = 1\Big/\left(T_{г.ц}^2 s^2 + 2\xi_{г.ц}T_{г.ц} + 1\right); \quad (20)$$

$$W_{вых}(s) = 1/s. \quad (21)$$

На рис. 2 приведена структурная схема системы управления, составленная на основе выражений (12)—(21). Как видно из рис. 2, МСАУ является многоконтурной и содержит как местные, так и перекрещивающиеся обратные связи передачи сигналов между звеньями. Это существенно осложняет преобразование структурной схемы, однако не является неразрешимым препятствием.

Структурная схема дает наглядное представление о взаимодействии механизмов автоматической системы. Она отображает процесс формирования и прохождения информационных сигналов между компонентами системы при преобразовании этих сигналов инерционными звеньями.

gz118.indd 11 20.12.2017 8:26:43

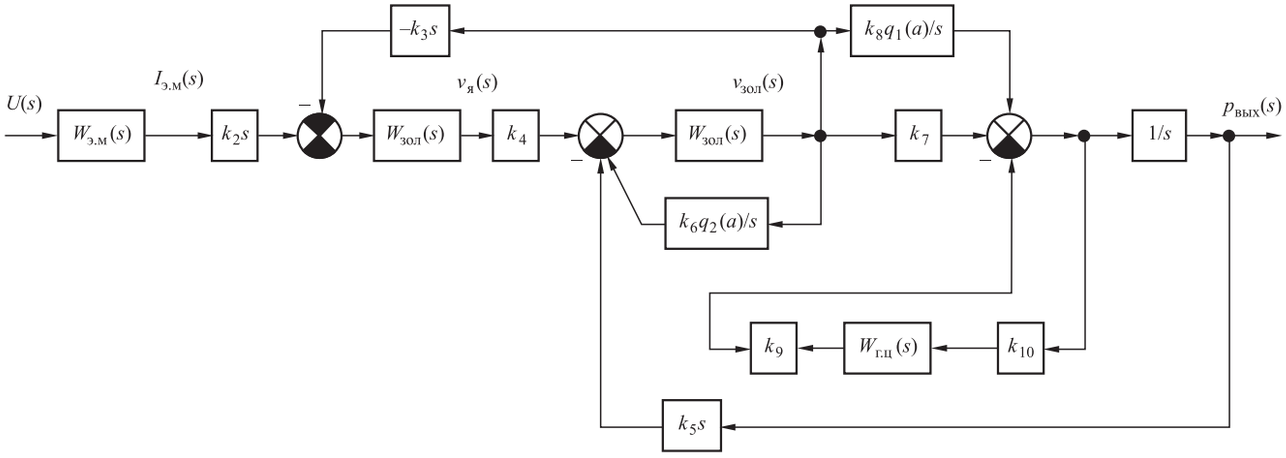


Рис. 2. Структурная схема мехатронной системы управления

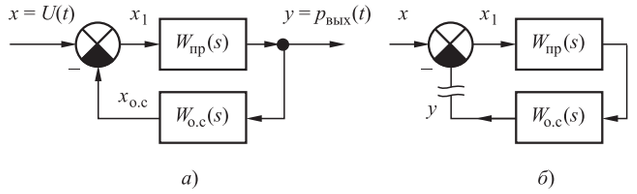


Рис. 3. Структурные схемы замкнутой (*а*) и разомкнутой (*б*) системы управления

Для выполнения исследования устойчивости процесса функционирования автоматической системы ее необходимо подвергнуть преобразованию с целью приведения к схеме, показанной на рис. 3, *а* и *б*. Приведение осуществляется на основе известных правил преобразования структурных схем [5, 6]. В схеме на рис. 3, *а* звено с передаточной функцией $W_{пр}(s)$ преобразует сигнал на его входе $x_1 = x - x_{о.с}$ в выходной сигнал $y = p_{вых}(t)$, где $x = U(t)$ — сигнал на входе системы, поступающий от контроллера управления; $x_{о.с}$ — сигнал обратной связи; $p_{вых}(t)$ — давление рабочей жидкости на выходе золотникового клапана регулятора-распределителя, подаваемого в гидроцилиндр фрикциона в процессе его включения [1].

Для применения метода логарифмических частотных характеристик при оценке устойчивости автоматической системы необходимо, чтобы передаточная функция разомкнутой системы $W_р(s)$ представляла комбинацию из передаточных функций звеньев, согласно выражению [6]:

$$W_р(s) = \frac{K}{s^r} \frac{\prod_{j=1}^{m} W_\tau(s)}{\prod_{i=1}^{n-r} W_T(s)}, \qquad (22)$$

где K — результирующий коэффициент передачи автоматической системы; r — количество интегрирующих звеньев в системе.

В выражении (22) не допускается наличие суммирования передаточных функций, поскольку логарифм суммы не существует. Этому условию не отвечает исследуемая система управления. Из структурной схемы на рис. 2 видно, что на входах интегрирующего звена $W(s) = 1/s$ и звена гидроцилиндра $W_{г.ц}(s)$ происходит суммирование выходных сигналов звеньев с передаточными функциями $W_{зол}(s)$, $W_{г.ц}(s)$ с учетом пропорциональных звеньев k_7, k_9 и интегрирующего звена $W(s) = k_8 q_1(a)/s$. Следовательно, применение метода логарифмических частотных характеристик в данном случае невозможно. В результате возникает необходимость разработки методики, которая позволила бы решить поставленную проблему.

Частотные характеристики системы управления можно всегда получить универсальным методом, заключающимся в интегрировании системы дифференциальных уравнений при подаче гармонического воздействия (6) на вход системы. После завершения переходного процесса в системе установятся гармонические колебания. Определив амплитуды A_x установившихся процессов колебаний $x(t)$, по формуле (7) вычисляют АЧХ. Сравнивая фазы колебаний φ_x процессов $x(t)$ с начальной фазой воздействия φ_q, согласно выражению (8), определяют ФЧХ.

Следует однако иметь в виду, что использование в этом случае линеаризованной системы уравнений (11) чревато существенными погрешностями результатов исследований. Графики реальных процессов $x(t)$ отклоняются от формы гармонической функции и могут значительно из-

gz118.indd 12 20.12.2017 8:26:43

меняться при различных частотах и амплитудах воздействия. На это обстоятельство обращалось внимание в [1], где была отмечена, в частности, существенная зависимость значений резонансных частот от параметров нелинейных элементов системы. Поэтому наиболее целесообразно определять частотные характеристики на основе исходной нелинейной математической модели.

Для получения частотных характеристик мехатронной системы управления фрикционами переключения передач автоматической трансмиссии использована математическая модель (1), приведенная в [1]. На входе системы (см. рис. 2) задавалось гармоническое воздействие:

$$U(t) = U_0 + A_U \sin\left(\omega t + \varphi_0\right), \qquad (23)$$

где U_0 — среднее значение воздействия, соответствующее рабочей точке координаты регулятора давления $x_{я0}$; A_U — амплитуда воздействия; φ_0 — начальная фаза.

При моделировании полагали, что получаемые графики изменения исследуемых процессов $x(t)$ достаточно близки к гармоническим:

$$x(t) = x_0 + A_x \sin\left(\omega t + \varphi_x\right), \qquad (24)$$

где x_0 — средние значения исследуемых процессов $x(t)$; A_x, φ_x — амплитуды колебаний и фазовые углы этих процессов.

Выполнение исследований начинается с оценки значений резонансных или собственных частот системы, что необходимо для выбора диапазона изменения частоты внешнего воздействия $U(t)$ на объект. В первом приближении для этого можно использовать информацию о постоянных времени T_i инерционных звеньев автоматической системы. Приближенно собственные частоты найдем из соотношений $\omega_{ci} = 1/T_i$. Значения ω_c в данном случае находятся в пределах 163...2868 рад/с (26...456 Гц). Принимая во внимание эту приближенную оценку, вычисление частотных характеристик выполнялось в диапазоне ω = 0...3140 рад/с (0...500 Гц).

Методика определения АЧХ заключалась в следующем. Варьируя частотой воздействия ω в принятых пределах с шагом $\Delta\omega$, осуществлялось интегрирование системы уравнений математической модели. Значения АЧХ вычисляли после завершения переходного процесса. Время переходного процесса $t_п$ принимали в пределах $t_п = (2...3)\pi/\omega_c$. Исследованиям подвергались процессы, характеризующие качество функционирования всех компонентов МСАУ: величина тока в обмотке электромагнита $I_{э.м}$; перемещение якоря электромагнита $x_я$; давление регулятора $p_{р.д}$; перемещение золотника $x_{зол}$; давление на выходе золотникового клапана $p_{вых}$; давление в гидроцилиндре фрикциона $p_{г.ц}$. По графикам результатов интегрирования находили максимальные положительные отклонения x_{max} всех исследуемых процессов от средних значений x_0 и принимали их в качестве амплитуд установившихся колебаний этих процессов $A_x = x_{max} - x_0$, а также определяли время сдвига графика процесса $x(t)$ относительно графика воздействия $q(t)$. Затем по формуле (7) вычисляли АЧХ, а ФЧХ находили из выражения:

$$\varphi_x^U(\omega) = -360\left(t_x^U / T_U\right), \qquad (25)$$

где t_x^U — время сдвига $x(t)$ относительно $U(t)$; T_U — период гармонического воздействия на входе системы управления $U(t)$: $T_U = 2\pi/\omega$.

На рис. 4 показаны графики установившихся колебаний перемещения золотника $x_{зол}$ и давления на выходе золотникового клапана $p_{вых}$ после завершения переходного процесса, а также график воздействия — напряжения U, подаваемого на обмотку пропорционального электромагнита с частотой ω = 100 рад/с (ν = 15,915 Гц). На графиках отображены параметры, используемые при вычислениях АЧХ и ФЧХ.

При непосредственном применении формулы (7) значения АЧХ получаются с соответствующими единицами измерения. Например, единицей измерения АЧХ перемещения золотника будет мм/В (или м/В — в системе СИ).

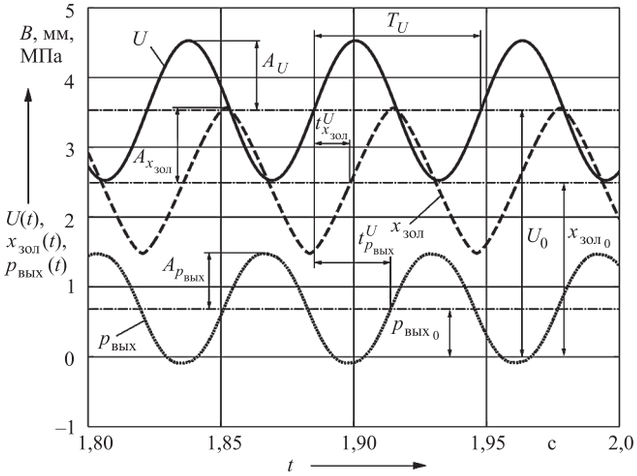


Рис. 4. Графики установившихся колебаний исследуемых процессов МСАУ с отображением параметров, используемых при определении АЧХ и ФЧХ

gz118.indd 13 20.12.2017 8:26:43

Для получения искомых значений стандартных показателей качества процесса функционирования системы используются безразмерные АЧХ. Приведение АЧХ к безразмерному виду осуществляется с помощью нормирующего коэффициента N_x, представляющего собой отношение амплитуды воздействия A_U к среднему значению исследуемого процесса x_0, т. е. к амплитуде процесса $x(t)$ при нулевой частоте $\omega = 0$:

$$N_x = A_U / x_0 . \qquad (26)$$

Безразмерные значения АЧХ вычисляются из выражения:

$$A_x^U(\omega) = \left(A_x / A_U\right) N_x . \qquad (27)$$

Для вычислений АЧХ и ФЧХ были разработаны и использованы специальные компьютерные программы.

Результаты исследования

Значения x_0 для каждого исследуемого процесса вычислены путем решения системы алгебраических уравнений, описывающих статическое состояние механизмов МСАУ при выбранной величине U_0 = 3,53 В. При этом использовались уравнения (10), приведенные в [1]. Принятому U_0 соответствуют статические значения исследуемых процессов: I_0 = 0,207 А; $x_{я0}$ = 0,045 мм; $p_{р.д0}$ = 0,715 МПа; $x_{зол0}$ = 2,6 мм; $p_{вых0}$ = 0,689 МПа; $p_{г.ц0}$ = 0,689 МПа.

На рис. 5, *а—е* приведены полученные АЧХ исследуемых процессов МСАУ, а на рис. 6 — ФЧХ перемещения золотника $\varphi_{x_{зол}}^U(\nu)$ и давления на выходе золотникового клапана $\varphi_{p_{вых}}^U(\nu)$. АЧХ и ФЧХ позволяют оценивать качество и устойчивость процесса функционирования автоматической системы при осуществлении управления объектом (в нашем случае — фрикционом гидромеханической передачи). Управляющее воздействие $U(t)$ носит переменный, как правило, периодический характер, что может приводить к неустойчивой работе, возникновению резонансных колебаний с большими амплитудами. Такой режим работы автоматической системы недопустим.

АЧХ дает представление о динамических свойствах системы при переменных периодических управляющих воздействиях и позволяет выявлять резонансные режимы. Относительные безразмерные значения АЧХ представляют собой по существу зависимости коэффициентов динамичности процессов от частоты воздействия. Интервал частот воздействия, при котором АЧХ $A_x^U(\nu)$ превышает значение $0{,}707x_0$, называют полосой пропускания системы. В полосе пропускания автоматическая система может воспроизводить высокочастотные помехи и существенно ухудшать показатели качества процесса управления. Поэтому желательно, чтобы ширина полосы пропускания была как можно меньшей.

АЧХ, представленные на рис. 5, *а—в*, характеризуют свойства регулятора давления механизма управления фрикционом, а на рис. 5, *г—е* — свойства золотникового клапана регулятора-распределителя. Рассматривались три варианта конструктивного исполнения золотникового клапана, исследования переходных характеристик которого приведены в статье [1]. Первый вариант соответствовал образцу механизма, принятому к производству. Параметры этого варианта: соотношение диаметров поясков золотника $d_б/d_м$ = 1,083; диаметры дросселей обратной связи и межкамерного $d_{о.с} = d_{м.к}$ = 0,8 мм; величина перекрытия дросселирующих щелей золотника $\Delta_п$ = 0,2 мм. Во втором варианте $\Delta = 0$ и $d_{о.с} = d_{м.к}$ = 0,8; в третьем $\Delta_п$ = 0,2 и $d_{о.с} = d_{м.к}$ = 1,5 мм. Установлено, что изменение параметров золотникового клапана не отражается на частотных характеристиках регулятора давления. Это достигнуто установкой дросселя между рабочей камерой регулятора давления и камерой управления золотниковым клапаном — межкамерного дросселя (см. рис. 2 в [1]).

Как видно из рис. 5, *а*, резонансных режимов колебаний тока в обмотке электромагнита не наблюдается. Перемещение якоря электромагнита $x_я$ имеет две резонансных частоты: ν_{p1} = 210,9 Гц и ν_{p2} = 386 Гц. При ν_{p1} коэффициент динамичности и примыкающая полоса пропускания незначительны, поэтому регулятор давления обеспечивает устойчивое управление давлением $p_{р.д}$ в пределах частоты до 380 Гц (см. рис. 5, *в*). Более высокая частота воздействия маловероятна.

АЧХ золотникового клапана представлены на рис. 5, *г—е*. Они существенно отличаются от АЧХ регулятора давления. Количество резонансных режимов колебаний золотника $x_{зол}(t)$ и значение коэффициента динамичности зависят от конструктивного исполнения золотникового клапана. АЧХ первого варианта конструктивного исполнения изображены на рис. 5, *г—е* сплошной линией, второго варианта — штриховой линией, а третьего — пунктиром. У первого варианта ν_{p1} = 13,53 Гц, ν_{p2} = 46,15 Гц; у третьего —

gz118.indd 14 20.12.2017 8:26:44

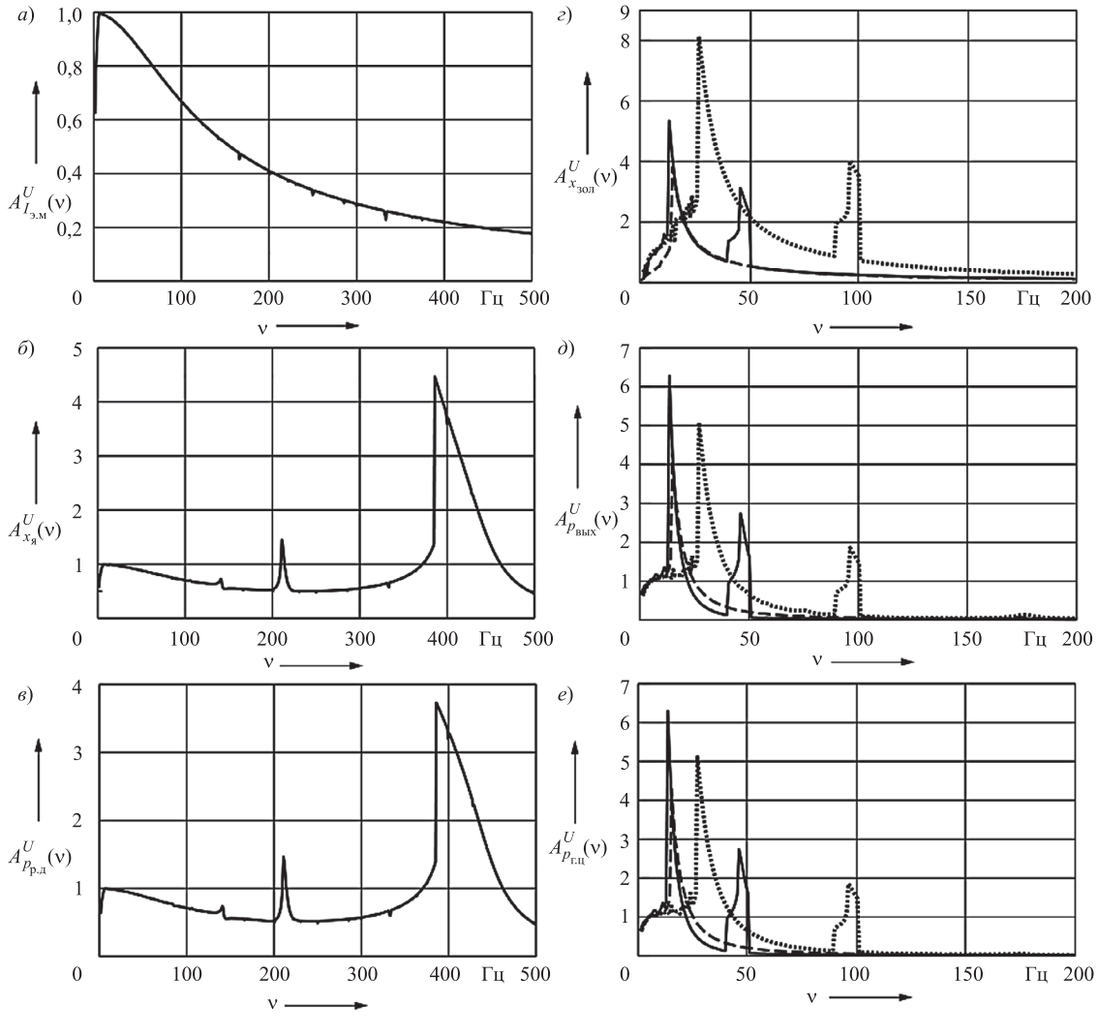


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики регулятора давления (*а*, *б*, *в*) и регулятора-распределителя МСАУ (*г*, *д*, *е*)

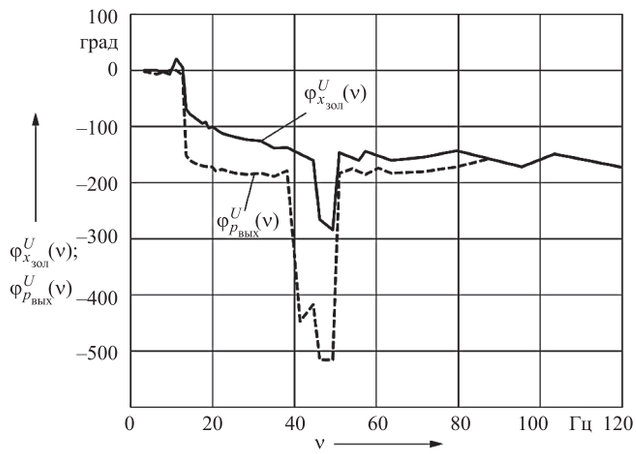


Рис. 6. Фазово-частотные характеристики золотникового клапана с положительным перекрытием

ν_{p1} = 27,06 Гц, ν_{p2} = 96,29 Гц. Вторая резонансная частота возникает вследствие влияния положительного перекрытия. С уменьшением диаметров дросселей золотникового клапана $d_{о.с}$ и $d_{м.к}$ резонансные частоты снижаются, а полосы пропускания сужаются, т. е. результат оказывается противоречивым, поскольку улучшение показателей качества функционирования достигается повышением значений резонансных частот и снижением полосы пропускания. Аналогичные противоречия наблюдаются при увеличении диаметров дросселей (пунктирные линии на рис. 5, *г—е*).

Наилучшие динамические свойства золотникового клапана достигаются при нулевом перекрытии дросселирующих щелей $\Delta_п = 0$. Однако такой вариант создает технологические проблемы точности изготовления золотниковой пары.

gz118.indd 15 20.12.2017 8:26:44

Отрицательное же перекрытие неприемлемо вследствие увеличения расхода рабочей жидкости на слив в процессе регулирования, что приводит к нестабильной работе системы управления на низкочастотных режимах вращения двигателя, когда возникает дефицит подачи насоса гидросистемы. Поэтому рекомендуется использовать положительное перекрытие, желательно в пределах $\Delta_п$ = 0,1...0,2 мм.

На рис. 6 приведены фазово-частотные характеристики перемещения золотника $\varphi^{U}_{x_{зол}}(\nu)$ и давления на выходе $\varphi^{U}_{p_{вых}}(\nu)$ золотникового клапана с положительным перекрытием дросселирующих щелей. В полосе пропускания, примыкающей к первому резонансному режиму, сдвиг по фазе устремляется к частоте — π рад (минус 180 град), причем сдвиг по фазе графика давления $p_{вых}(t)$ относительно гармонического сигнала воздействия $U(t)$ существенно больший, чем сдвиг графика перемещения золотника $x_{зол}(t)$. Но частоты колебаний всех трех процессов $x_{зол}(t)$, $p_{вых}(t)$ и $U(t)$ одинаковы (см. рис. 4).

В полосе пропускания, примыкающей ко второму резонансу ν_{p2}, характер взаимного изменения амплитуд колебаний этих процессов претерпевает существенные изменения. Происходит автоматическая перенастройка частоты колебаний золотника и графика выходного давления. Их частота становится в три раза меньше, чем частота воздействия $U(t)$. Графики колеба-

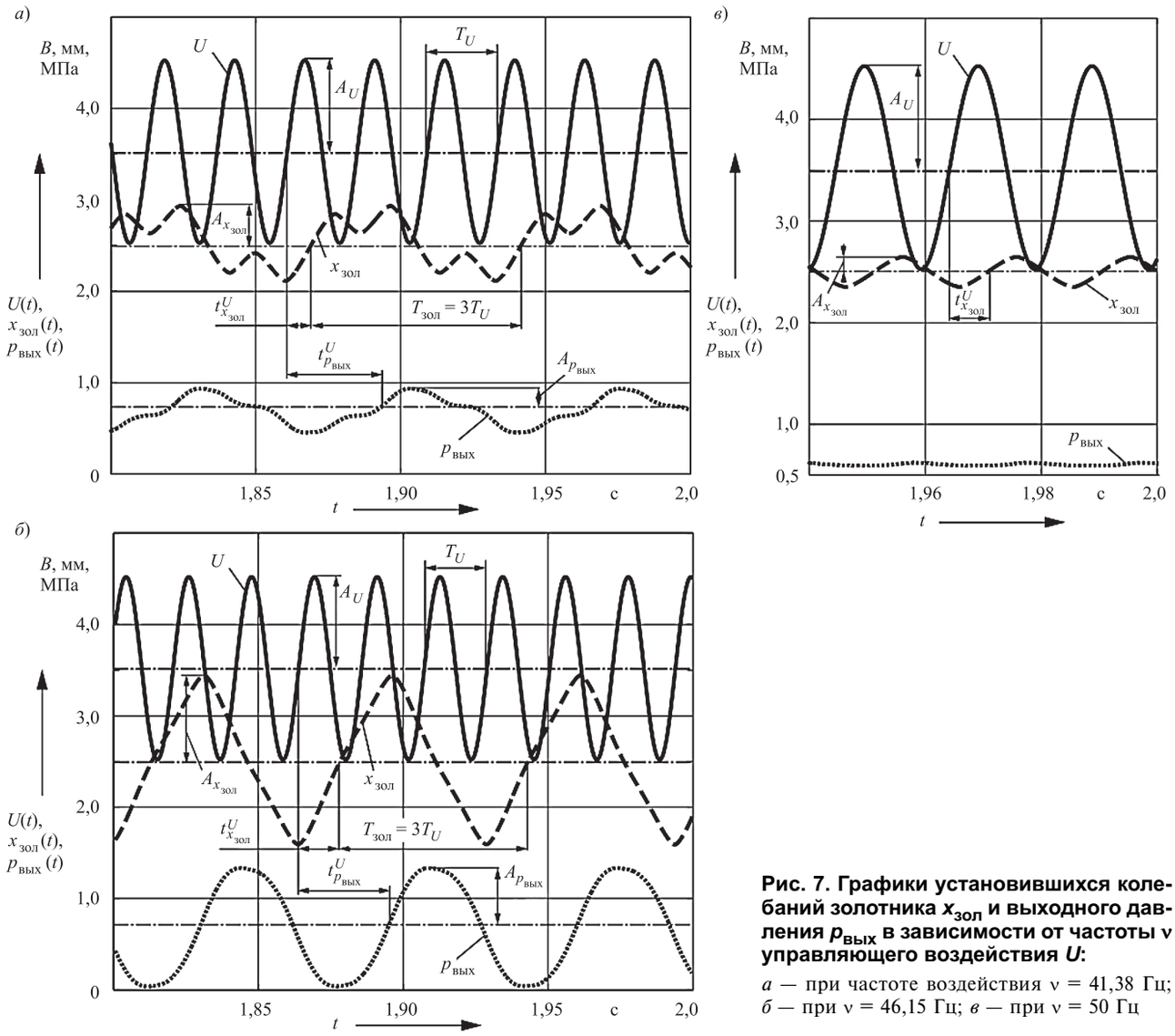


Рис. 7. Графики установившихся колебаний золотника $x_{зол}$ и выходного давления $p_{вых}$ в зависимости от частоты ν управляющего воздействия U:

а — при частоте воздействия ν = 41,38 Гц; *б* — при ν = 46,15 Гц; *в* — при ν = 50 Гц

gz118.indd 16 20.12.2017 8:26:45

ний процессов $x_{зол}(t)$, $p_{вых}(t)$ и $U(t)$ при вхождении во вторую полосу пропускания при частоте $\nu = 41{,}38$ Гц ($\omega = 260$ рад/с) показаны на рис. 7, *а*, а при резонансной частоте $\nu_{p2} = 46{,}15$ Гц ($\omega_{p2} = 290$ рад/с) — на рис. 7, *б*. Эти графики дают наглядное представление о прохождении перестройки колебательных процессов $x_{зол}(t)$ и $p_{вых}(t)$. Они существенно отклоняются от гармонической характеристики воздействия $U(t)$. При этом сдвиг по фазе между ними возрастает и достигает на резонансной частоте ν_{p2} для перемещения золотника $\varphi^{U}_{x_{зол}}(\nu)_{max} = 243$ градуса, а для давления — $\varphi^{U}_{p_{вых}}(\nu)_{max} = 527$ градусов.

При выходе из полосы пропускания, примыкающей к резонансу ν_{p2}, исходная частота колебаний процессов $x_{зол}(t)$ и $p_{вых}(t)$ восстанавливается, и сдвиг по фазе сокращается, что видно из рис. 7, *г*. Амплитуды колебаний этих процессов резко уменьшаются, и система управления функционирует устойчиво с высокими показателями качества.

У золотникового клапана с нулевым перекрытием эффект перенастройки частоты колебаний отсутствует.

Выводы

1. Предложена методика определения амплитудно-частотных и фазово-частотных характеристик системы автоматического управления, основанная на использовании результатов интегрирования системы нелинейных дифференциальных уравнений математической модели исследуемого объекта.

2. Получены АЧХ и ФЧХ мехатронной системы управления фрикционами гидромеханической передачи с автоматическим переключением передач, на основе которых выполнена оценка показателей качества и устойчивости процесса функционирования созданной МСАУ для карьерных самосвалов БелАЗ.

3. Получены значения резонансных частот и коэффициентов динамичности процессов функционирования компонентов МСАУ, определены полосы пропускания вибраций при осуществлении управления с периодическим характером изменения управляющего воздействия.

4. Резонансная частота регулятора давления существенно выше (в 4—10 раз) резонансных частот регулятора-распределителя и практически не оказывает влияния на динамичность характеристики формируемого выходного давления МСАУ.

5. Установлено, что АЧХ регулятора давления созданной МСАУ не зависят от параметров золотникового клапана регулятора-распределителя, формирующего выходной сигнал давления управления фрикционом гидромеханической передачи. Это достигнуто установкой дросселя между рабочей камерой регулятора давления и камерой управления золотниковым клапаном (межкамерного дросселя).

6. Выбор конструктивных параметров золотникового клапана регулятора-распределителя существенно влияет на показатели качества процессов управления давлением фрикционов гидромеханической передачей. Минимальные коэффициенты динамичности колебаний золотника и выходного давления достигаются при нулевом перекрытии дросселирующих щелей золотникового клапана. Увеличение диаметров дросселей обратной связи золотникового клапана и межкамерного сдвигает резонансные частоты в область более высоких частот и приводит к возрастанию коэффициента динамичности.

7. В полосе пропускания, перекрывающей вторую резонансную частоту колебаний золотникового клапана с положительным перекрытием, происходит автоматическая перенастройка колебательного процесса, сопровождаемая снижением частоты колебаний золотника в три раза по сравнению с частотой управляющего воздействия, а их колебания происходят в противофазах. При нулевом перекрытии такой эффект отсутствует.

8. Применение предложенной методики позволяет проектировать системы автоматического управления с высокими показателями качества и устойчивости процесса функционирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Тарасик В. П.** Моделирование мехатронной системы управления фрикционами переключения передач автоматической трансмиссии автомобиля // Грузовик. — 2017. — № 10. — С. 7—15.
2. **Тарасик В. П., Савицкий В. С.** Методика проектирования механизма управления фрикционами гидромеханической передачи на основе математического моделирования процесса его функционирования // Грузовик. — 2016. — № 6. — С. 3—12.
3. **Пат. 2 459 982 РФ, МПК F 15B 13/043; F 16H 61/06.** Двухступенчатый электрогидравлический механизм управления давлением / В. П. Тарасик, Н. Н. Горбатенко, И. М. Дычкин и др; заявитель и патентообладатель Белорус.-Рос. ун-т; заявл. 30.11.2010; опубл. 27.08.2012. Бюл № 24. — 13 с.
4. **Мехатронная система** управления гидромеханической передачей карьерных самосвалов БелАЗ / В. П. Тарасик, Н. Н. Горбатенко, Р. В. Плякин, А. Н. Егоров, В. В. Региня // Грузовик. — 2011. — № 2. — С. 2—11.
5. **Ксеневич И. П., Тарасик В. П.** Теория и проектирование автоматических систем. — М.: Машиностроение, 1996. — 479 с.
6. **Бесекерский В. А., Попов Е. П.** Теория систем автоматического управления. — СПб.: Профессия, 2003. — 752 с.
7. **Тарасик В. П., Савицкий В. С.** Экспериментальные исследования электрогидравлического пропорционального клапана мехатронной системы управления автоматической коробкой передач // Тракторы и сельхозмашины. — 2016. — № 9. — С. 10—18.

gz118.indd 17 20.12.2017 8:26:46

УДК 620.1; 621.91:658.56

О. В. Жедь, канд. техн. наук, доцент, **В. В. Копылов,** канд. техн. наук, доцент,
Российский университет дружбы народов (РУДН)
E-mail: zhed_ov@pfur.ru

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ОТВЕРСТИЯ ЗУБЧАТОГО ВЕНЦА НА ЕГО ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ СБОРКЕ С БАЗОВОЙ ДЕТАЛЬЮ. ЧАСТЬ 2

Исследуется методом фотомеханики напряженно-деформированное состояние (НДС) нежесткого зубчатого венца, у которого искажена форма отверстия на этапе чистовой обработки вследствие упругих деформаций от сил зажима кулачками самоцентрирующего патрона. По этой причине при посадке венца на базовую деталь с натягом возникает неравномерное давление на контуре его отверстия, из-за чего формируется предварительное неравномерное НДС в переходных галтелях межзубного пространства, что снижает ресурс зубчатого венца по изгибным напряжениям.

Ключевые слова: *зубчатый венец, фотомеханика, точность формы отверстия, натяг, предварительное неравномерное напряженно-деформированное состояние.*

Investigated by the method of photomechanics, the stress-deformed state (TDS) of a non-rigid gear crown, in which the shape of the hole is distorted during the clean-working process due to elastic deformations from the clamping forces of the cams of the self-centering cartridge. For this reason, when the crown is placed on the base part with interference, there is uneven pressure on the contour of its hole, which causes the formation of a preliminary non-equalized TDS in the transitional fillets of the interdental space, which reduces the service life of the gear crown by flexural stresses.

Keywords: *dentate crown, photomechanics, whole shape accuracy, interference, preliminary uneven stress-strain state.*

(Рисунки на 2—4-й полосах обложки)

Материал модели и техника физических экспериментов

Для изготовления моделей зубчатых венцов в работе использовался оптически чувствительный материал на основе эпоксидной смолы ЭД-6, которая отверждается метилтетрагидрофталевым ангидридом (МТГФА), с добавлением ускорителя (диметиланилина ДМА) и пластификаторов (дибутилфталата ДБФ) или алифатических эпоксидных смол. Тарирование оптических свойств материала, из которого были изготовлены модели зубчатых венцов, осуществлялось нагружением плоского диска, из такого же материала, что и модели венцов. Тарируемый диск устанавливался в реверсор и при помощи универсального пресса УП-8 прикладывались силы сжатия P_i в его вертикальной диаметральной плоскости. На основании экспериментальных данных, полученных в ходе тарировки, вычисляется оптическая постоянная из выражения:

$$\sigma_0^{1,0} = \frac{8P_i}{\pi d n_c},$$

где $\sigma_0^{1,0}$ — оптическая постоянная, МПа·см/пол. или кгс/см/пол.; P_i — нагрузка, прикладываемая к диску при тарировке, Н или кгс; n_c — число интерференционных полос в центре диска диаметром d, см, подсчитываемое от его свободного контура в горизонтальном диаметральном сечении, на котором всегда порядок полосы $n = 0$. Оптическая постоянная материала зубчатых венцов составляет $\sigma_0^{1,0} = 19{,}35$ кгс/см/пол. С учетом толщины материала из которого изготовлены модели зубчатых венцов $t = 0{,}48$ см цена полосы модели равна $\sigma_0^t = \sigma_0^{1,0}/t = 19{,}35/0{,}48 = 40{,}3$ кгс/см^2/пол. = = 4,1 МПа/пол.

gz118.indd 18 20.12.2017 8:26:46

Выявлено физическим экспериментом на оптических моделях влияние искажения формы отверстия зубчатого венца, приобретенной на этапе механической обработки, на неравномерность его натяга с базовой деталью после их сборки в отдельный узел. Вследствие неравномерного натяга создается неравномерное напряженное состояние в теле венца, которое распространяется до галтелей межзубного пространства. В связи с этим часть галтелей венца (в зависимости от схемы нагружения), располагающаяся в секторах с повышенным уровнем натяга, предварительно подвержена более высоким тангенциальным напряжениям растяжения по сравнению с другими секторами напряженной модели, в которых натяги меньше. Вследствие такого явления будет иметь место неучтенное в расчетах снижение ресурса зубчатого венца по изгибным напряжениям в основании зубьев венца. В процессе моделирования предварительного напряженного состояния в галтелях межзубного пространства с учетом искажения формы отверстия венца от сил зажима на этапе финишной обработки разработано и изготовлено нагружающее устройство (рис. 3) — оправка. Применение оправки обеспечило параметры силового замыкания с контуром отверстия модели зубчатого венца, что позволило создать натяг с характеристиками искаженной формы его отверстия. Для этого эпюру напряжений от сил зажима необходимо трансформировать в эпюру перемещений точек контура отверстия в радиальном направлении.

Наиболее ответственным элементом нагружающей оправки является упругое кольцо *2*, с помощью которого можно задать натяг между отверстием венца при его распоре за счет сближения конусов фланцев *1*, *3* вследствие закручивания болта *5* в тело направляющей части оправки *4*. Незначительное отклонение от соосности отверстия кольца с двусторонним симметричным конусом на внутреннем контуре по отношению к его внешнему цилиндрическому контуру приводит к неравномерному сечению в радиальном направлении на различных его участках, что создает переменную жесткость кольца, асимметрию конусных фасок отверстия и влияет на характер натяга между отверстием зубчатого венца и упругим кольцом. Исследовались две модели зубчатого венца. У первой модели зубчатого венца № 1 искажение формы отверстия, полученные при съеме круглограммы, были минимальными и практически не оказывали влияния на равномерность натяга (рис. 4, *а*, *б*). По этой причине модель № 1 условно считаем без искажений контура отверстия, а модель № 2 принимаем с искаженным контуром отверстия (см. рис. 4, *в*, *г*). Параметры искажения формы отверстия зубчатого венца в радиальном направлении модели № 2 приняты по характеру эпюры контурных напряжений отверстия от сил зажима в 3-кулачковом патроне (см. рис. 1, *в*) для случая базирования по внешнему контуру нежесткого венца. В выбранном масштабе линейных величин эти искажения введены в рабочий чертеж зубчатого венца оптической модели № 2 и реализованы при обработке ее отверстия. Следовательно, с аналогичными искажениями формы отверстия модели, приводящие к ее НДС (см. рис. 4, *в*, *г*), зубчатый венец в дальнейшем поступает на сборку с базовой деталью.

При выполнении физического эксперимента модель зубчатого венца устанавливалась на стол поляризационно-проекционной установки ППУ-7 и просвечивалась поляризованным монохроматическим светом ртутной лампы с длиной волны $\lambda = 546$ мкм. Изображение предварительно нагруженной модели на лабораторном полярископе проектировалось на экран установки, изучалось и затем корректировалась величина силы P_i давления по условиям эксперимента. Когда достигался ожидаемый результат по нагружению модели, в поток поляризованного света после анализатора устанавливался цифровой фотоаппарат. В прямых лучах светового потока выполнялась съемка фотограмм. Фотограммы, снятые в белом свете (цветные), использовались для изучения нулевых и изотропных зон, а фотограммы, снятые в монохроматическом свете ртутной лампы (зеленый фильтр) предварительно переводились в черно-белый формат и применялись для расшифровки картины полос и оценки напряженного состояния модели венца в целом. Нагружение модели венца № 2 с искаженной формой отверстия выявила неравномерное напряженное состояние по всей площади фотограммы модели венца (см. рис. 4, *в*, *г*). Однако эта неравномерность распределения напряжений подчиняется характеру распределения упругих напряжений, вызванных силами зажима в 3-кулачковом патроне. На фотограмме можно выделить три сектора, расположенные под углом 120° относительно друг друга, в каждом из которых имеется по два зуба с предварительно напряженной переходной галтелью в межзубном пространстве. А между этими предварительно напряженными зубьями можно выделить еще три сектора с четырьмя зубьями в каждом, которые также расположены под углом 120° друг относи-

gz118.indd 19 20.12.2017 8:26:47

тельно друга. В переходных галтелях этих зубьев напряжения либо близки к нулю, либо сменили знак напряжений растяжения на сжатие вследствие того, что в этих локальных участках перед галтелью появилась изотропная зона. Искажение формы отверстия модели зубчатого венца моделируется законом давления фланцев конструкции нагружающей оправки на эластичную втулку.

Очевидно, при правильной форме конусов фланцев и правильной форме отверстия модели № 1, создается равномерное давление по контуру эластичной втулки в случае сближения фланцев. Это равномерное давление от эластичной втулки передается контуру отверстия зубчатого венца, толщина которого составляет $t = 0{,}48$ см, а толщина эластичной втулки 0,7 см выполнена с запасом, чтобы обеспечить полный контакт поверхности отверстия модели венца с нагружающей оправкой. По всей поверхности венца эквидистантно контуру отверстия формируются изолинии максимальных касательных напряжений $2\tau_{\text{макс.}} = \sigma_1 - \sigma_2$ (рис. 4, *б*).

Изолинии, которые расположены ближе к отверстию венца, приобретают концентричную отверстию форму. Изолинии, удаленные от отверстия венца, приобретают волнообразную форму с шагом, равным шагу зубьев. Амплитуда волны изохромы в радиальном направлении зависит от ее удаленности от контура отверстия, и тем больше ее величина, чем она дальше расположена от контура отверстия, т. е. ближе к зубчатому венцу. Изменение формы полос (изохром) объясняется изменением жесткости кольцеобразной части венца при приближении изолиний к основанию зубьев венца. При больших натягах изолинии перемещаются на тело зубьев, а в галтелях межзубного пространства формируются очаги повышенной концентрации напряжений, создавая предварительное НДС, которое следует учитывать при оценке ресурса зубчатого венца.

Для удобства расшифровки фотограмм, полученных в ходе выполнении физических экспериментов, предлагается **расчетно-экспериментальный метод** определения силы давления P_0 на поверхность отверстия кольца, базирующийся на аналитических выражениях Ляме [2]. На этом этапе экспериментальной части работы сначала изучались кольца с правильной формой отверстия (рис. 5, *а*, *б*), неискаженной деформацией от сил зажима, что при нагружении равномерным давлением P_0, вызываемым натягом, создает равномерное НДС с изолиниями правильной кольцевой формы, расположенными эквидистантно контуру отверстия. В варианте нагружения кольцевых аналогов, которые вписываются в геометрические размеры рассматриваемого зубчатого венца, приводятся в символьной форме его геометрические параметры (рис. 5, *б*). Номинальные тангенциальные напряжения растяжения $\sigma_{\theta\theta_{\text{ном}}}$ от сил давления на радиусе — r_1, r_2, r_i, $r_{\text{в}}$ модели кольца или зубчатого венца, например $r_i = r_1 + a$, определяются по формуле Ляме:

$$\sigma_{\theta\theta_{\text{ном}}} = P_0 \frac{r_1}{r_2^2 - r_1^2}\left[1 + \frac{r_2}{(r_1 + a)^2}\right]. \qquad (1)$$

Для вычисления внутреннего давления P_0 воспользуемся формулой Ляме для контурных напряжений на свободной от нагрузки внешней окружности кольца:

$$\sigma_{\theta\theta_{\text{конт}}}^{\text{рас}} = \sigma_{1\text{конт}} = P_0 \frac{2r_1^2}{r_2^2 - r_1^2}. \qquad (2)$$

В то же время из эксперимента можно получить $\sigma_{\theta\theta_{\text{конт}}}^{\text{эксп}} = m_{\text{конт}}\sigma_0^t$, где $m_{\text{конт}}$ — порядок полосы на свободном контуре; σ_0^t — цена полосы оптически чувствительного материала конкретной модели. Таким образом, искомое внутреннее давление P_0 между отверстием модели и упругим кольцом оправки определяется из выражения:

$$P_0 = \frac{\sigma_{\theta\theta_{\text{конт}}}\left(r_2^2 - r_1^2\right)}{2r_1^2}. \qquad (3)$$

Это давление создает сжатие σ_{rr} в радиальном направлении, распирая упругое кольцо, расположенное в отверстии зубчатого венца. Одновременно это же давление приводит к появлению растягивающих напряжений $\sigma_{\theta\theta}$, действующих перпендикулярно направлению давления P_0, т. е. в тангенциальном направлении, эквидистантно отверстию зубчатого венца. За один оборот болта *5* фланец *3* смещается в осевом направлении вдоль центрирующей оправки на шаг его резьбы (см. рис. 3). С учетом угла конуса γ распирающего фланца можно рассчитать увеличение радиуса отверстия зубчатого венца $r_{1p_1} - r_1$, где r_1 — исходный радиус отверстия модели венца, когда давление отсутствует; r_{1p_0} — радиус отверстия модели венца, находящегося под давлением P_0.

Для установления параметров нагружения плоской модели зубчатого венца можно по известным механическим характеристикам материала модели и величиной давления P_0 определить допустимое увеличение ее внутреннего радиуса и соответствующее ему допустимое осевое перемещение h нагружающего конуса. Как следует из схемы

gz118.indd 20 20.12.2017 8:26:47

нагружения, модель зубчатого венца испытывает наибольшие деформации в зоне непосредственного контакта с тонкостенным кольцом, что может приводить к существенной неравномерности поля напряжений и эффекту местных напряжений вследствие неточности формы отверстия. Очевидно, что при возрастании усилия за счет деформаций кольцевой части отверстия модели венца, происходит изменение НДС всего тела модели венца.

Размер допустимого перемещения конического фланца *3* устанавливается из соображений, что наибольшие напряжения на радиусе отверстия модели определяются из выражения, которые в конкретном случае принимаем как максимально допустимые:

$$\left[\sigma_{\theta\theta_{\text{макс}}}\right] = \sigma_{\theta\theta_{\text{макс}}} = P_0 \frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2}. \qquad (4)$$

В свою очередь, по теории Ляме увеличение радиуса отверстия модели венца $U_0 = r_{1p_0} - r_1$ при давлении P_0 имеет следующий вид:

$$U_0 = \frac{P_0 r_1}{E}\left(\frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} + \nu\right), \qquad (5)$$

где E — модуль упругости 1-го рода, ν — коэффициент Пуассона. Приняв максимально допустимый уровень напряжений как $\sigma_B = \sigma_{\theta\theta_{\text{макс}}}$, получим зависимость для изменения радиуса отверстия модели венца:

$$U_0 = \frac{\sigma_B r_1}{a_{\sigma_k} E}\left(1 + \nu \frac{r_2^2 - r_1^2}{r_2^2 + r_1^2}\right). \qquad (6)$$

При известной величине угла γ нагружающего конуса фланца для его перемещения вдоль продольной оси нагружающей оправки на величину h будем иметь соотношение:

$$h = \frac{U_0}{\operatorname{tg}\gamma} = \frac{\sigma_B r_1}{a_{\sigma_k} E \operatorname{tg}\gamma}\left(1 + \nu \frac{r_2^2 - r_1^2}{r_2^2 + r_1^2}\right). \qquad (7)$$

По этой зависимости можно определить усилие P_0 давления, действующее через конус фланца на поверхность отверстия модели зубчатого венца. Рассчитаем для варианта фотограммы кольцевого аналога зубчатого венца (рис. 6, 7) величину давления P_0 на контуре отверстия по формуле Ляме. Запишем исходное выражение Ляме для случая принятия в расчет величину напряжений на контуре отверстия радиусом $r_1 = 1{,}6$ см и $r_2 = 2{,}3$ см:

$$\sigma_{\theta\theta_{\text{ном}}} = P_0 \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2}\left[1 + \frac{r_1^2}{r_1^2}\right] = P_0 1{,}88.$$

Отсюда имеем величину давления на контуре отверстия: $P_0 = \sigma_{\theta\theta_{\text{конт}}}^{\text{эксп}} / 1{,}88$. Подставим в уравнение (1) величину напряжений на контуре отверстия r_1 в $n \sim 5$ полос при цене одной полосы $\sigma_{\theta\theta_{\text{конт}}}^{\text{эксп}} = 40{,}3$ кгс/см^2/пол., получим величину давления, которым создано напряженное состояние модели зубчатого венца: $P_0 = 40{,}3 \cdot 5/1{,}88 = 107{,}2$ кгс/см^2 = 10,9 МПа.

Обработка экспериментальных данных и результаты работы в целом

Выполнена серия экспериментов по нагружению модели зубчатого венца с искаженной формой отверстия различными величинами натяга. Натяги принимались по характеру эпюры контурных напряжений отверстия от сил зажима венца в 3-кулачковом патроне при базировании по его внешнему диаметру на этапе обработки отверстия. В выбранном масштабе линейных величин искажения формы отверстия были выполнены на одной из исследуемых моделей венца. Была разработана программа ЧПУ обработки искаженной формы отверстия и затем реализована на фрезерном станке EMCO Mill. До и после обработки отверстия были сняты круглограммы — параметры формы отверстия зубчатого венца на кругломере MMQ 400. Рассмотрим два варианта нагружения искаженного отверстия модели № 2 венца давлением P_0, распираемой конусами оправки упругой втулки и создающий натяг на контуре отверстия венца. Первый вариант нагружения модели выполним при натяге, который является минимальным в серии выполненных экспериментов (рис. 6, *а*).

Модель венца № 2 устанавливалась на нагружающую оправку и контуру ее отверстия сообщалось давление P_0, как следствие разжима упругого кольца при сближении конусов фланцев нагружающей оправки. По причине искаженной формы отверстия на его контуре возникает неравномерное НДС, изображенное эпюрой *2* (рис. 8) тангенциальных контурных напряжений при минимальном натяге по данным обработки фотограммы первого эксперимента. Эпюра контурных напряжений *2* свидетельствует о том, что по всей поверхности контакта упругого кольца и отверстия модели выбран зазор, так как на его контуре отсутствуют нулевые точки и характер эпюры *2* зеркально подобен эпюре *1* (рис. 8, а также рис. 1, *в*) напряжений на свободном контуре в выбранном масштабе. Убедительным подтверждением отсутствия нулевых точек на контуре отверстия является цветная фотограмма (рис. 6, *б*), снятая в белом свете при круговой его поляризации. Действие этих напряжений с учетом их неравно-

gz118.indd 21 20.12.2017 8:26:47

мерности, исказивших контур отверстия модели № 2 после снятия сил зажима, проявляется на уровне переходных галтелей межзубного пространства. Обратим внимание на смену знака напряжений в сечении a_1—a_2. В радиальном направлении на контур отверстия действуют напряжения сжатия вследствие натяга до изотропной зоны, которая отсекает часть переходной галтели, в которой формируются напряжения растяжения как в радиальном, так и в тангенциальном направлениях.

Во второй серии экспериментов был увеличен натяг на контуре отверстия модели № 2 венца, что при сравнивании с данными первой серии экспериментов по максимальным полосам контурных напряжений отверстия привело к их увеличению примерно в 1,7 раза (см. рис. 8, эпюра *4*). Плотность полос (изолиний) на фотограмме модели увеличилась. Увеличился максимальный порядок полос в переходных галтелях. Если для варианта первой серии экспериментов максимальный порядок полосы в переходной галтели составил $n = 3{,}4$ полосы, то во второй серии для модели № 2 составляет $n = 5$ полос.

Сравнение эпюр *2* и *4* контурных напряжений отверстия при двух уровнях натяга, свидетельствует о влиянии величины натяга на величину напряжений в переходных галтелях межзубного пространства. С увеличением натяга в паре **отверстие венца — разжимная оправка** уровень напряжений в расчетных точках на изгиб в галтелях ножки зубьев возрастает. Величина изменения натяга контролируется по фотограмме, полученной при выполнении эксперимента. В рассматриваемом случае для двух величин натяга диапазон его изменения составил 70 % по отношению к минимальному значению в варианте. Исходный выбор минимальной величины натяга регламентировался следующими условиями, которые сводились к обеспечению четкой **визуализации** предварительного неравномерного напряженного состояния в расчетной точке на изгиб переходной галтели ножки зуба венца вследствие неравномерного натяга из-за искаженной формы отверстия венца.

Это требование выполнялось поэтапно. Сначала выбирался зазор в паре **отверстие венца — упругое кольцо разжимной оправки**, который контролировался на лабораторном полярископе незначительным просветлением модели венца при сообщении ей незначительных деформаций. В этом случае материал модели приобретает свойство искусственной анизотропии и становится двулучепреломляемым. Дальнейшее нагружение модели венца выполнялось на установке ППУ-7 в монохроматическом свете ртутной лампы, где хорошо контролировалось изменение напряженного состояния по мере увеличения натяга.

Для модели № 1 это условие состояло в том, чтобы на галтелях с минимальным уровнем деформаций сохранялась исходная нулевая зона, а в наиболее деформированных галтелях визуализировались напряжения растяжения в тангенциальном направлении. Такой вариант фотограммы (см. рис. 6, *а*) четко визуализирует неравномерное НДС в переходных галтелях ножек зубьев венца и побуждает задуматься о последствиях для ресурса зубчатого контура венца в варианте расчета на изгибную прочность. На фотограмме рис. 6, *а* максимальный ход (изменение) напряжений в переходных галтелях составляет $n \approx 3{,}5$ полосы с учетом того, что на отдельных галтелях наблюдаются незначительные участки с деформацией сжатия в десятую долю полосы. А полный ход только растягивающих напряжений составляет $n = 3{,}4$ полосы.

Далее приведем фотограммы экспериментов и их обработку в вариантах натяга моделей № 2. В этом случае, как и в варианте минимального натяга наблюдается незначительное (доля полосы) локальное напряженное состояние в переходной галтели с деформацией сжатия (сечение a_3—a_4, см. рис. 7, *в*). Максимальные напряжения растяжения в переходных галтелях достигают величины $n = 5$ полос. Натягом, варьирующимся в диапазоне $n_{мин(отв.)} = 3$ полосы и $n_{макс(отв.)} = 5$ полос создано такое предварительное напряженное состояние в галтелях.

Оценить эти экспериментально полученные величины можно, сравнив их с расчетными рабочими напряжениями на изгибную прочность в переходной галтели основания зуба венца, которые выполняются конструктором изделия.

Подобные расчетные параметры в настоящей работе не планировались в связи с тем, что в работе не заложена принадлежность исследуемого зубчатого венца к какой-либо конструкции или механизму. Преследовалась цель — обратить внимание конструкторов (разработчиков механизмов с нежесткими венцами) на наличие проблемы неравномерного напряженного состояния в переходных галтелях на этапе эксплуатации изделия в связи с конструкторско-технологическим обеспечением качества подобных нежестких зубчатых венцов, которые могут иметь последствия для ресурса изделия в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Кошеленко А. С., Позняк Г. Г.** Теоретические основы и практика фотомеханики в машиностроении. — М.: Издательский дом "Граница", 2004. — 296 с.
2. **Рогов В. А., Кошеленко А. С., Жедь О. В., Хишова Е. С.** Исследование методом фотомеханики напряженно-деформированного состояния зубчатого венца от сил зажима в самоцентрирующем патроне на этапах механической обработки // Грузовик. — 2016. — № 2. С. 19—22.

gz118.indd 22 20.12.2017 8:26:47

УДК 629.113.012.3

В. И. Копотилов, канд. техн. наук, доцент, профессор РАЕ, Тюменское высшее военно-инженерное командное училище имени маршала инженерных войск А. И. Прошлякова
E-mail: vikopotilov@mail.ru

КЛАССИФИКАЦИЯ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО КОЛЕСА

***С**формулированы кинематические критерии, на основе которых выделены пять основных режимов движения автомобильного колеса. Рассмотрены кинематические особенности каждого режима движения.*

***Ключевые слова:** режим движения, колесо, "чистое" качение, буксование, юз, пробуксовка, проскальзывание.*

Kinematic criteria are formulated on the basis of which five basis modes of automobile wheel movement. Kinematic features of each driving mode are considered.

***Keywords:** driving mode, wheel, "clean" rolling, slipping, skid, slippage.*

Как известно, у автомобильного колеса различают пять силовых режимов работы: ведущий, ведомый, тормозной, свободный и нейтральный. Впервые такие режимы нагружения были выделены академиком Е. А. Чудаковым [1, 2]. В 1972 г. они были зафиксированы в ГОСТ 17697—72 [3], а затем вошли во все учебники по теории автомобиля.

Каждому из этих режимов работы соответствует определенное сочетание силовых воздействий на колесо со стороны рамы (корпуса), трансмиссии автомобиля и опорной поверхности (дороги). К этим силовым воздействиям относятся [3]:

1 — крутящий момент $M_к$ и направление его действия;

2 — продольная реакция R_x опорной поверхности и ее направление;

3 — продольное усилие P_x рамы (корпуса) автомобиля и его направление.

Однако каждый из этих режимов, соответствуя определенному характеру нагружения, не дает ясного представления о кинематике движения колеса. Проиллюстрируем это на простых примерах.

При ведущем режиме колесо в зависимости от величины крутящего момента и его сцепления с дорогой может катиться как без пробуксовки, так и с пробуксовкой.

При работе в тормозном режиме качение колеса может происходить как без продольного скольжения, так и со скольжением, а в предельном случае даже юзом, т. е. без вращения. Как видим, в рамках одного и того же силового режима процесс движения колеса может иметь весьма значительные различия. Это указывает на то, что классификация силовых режимов работы колеса не отражает все кинематические особенности конкретного процесса качения. Следовательно, кроме силовых режимов работы колеса необходимо выделить и основные кинематические режимы его движения.

Такая классификация должна опираться на основные кинематические характеристики движения колеса, к которым следует отнести величину и направление векторов линейной скорости движения оси вращения V_o, скорости его скольжения по опорной поверхности V_S, а также наличие или отсутствие угловой скорости вращения ω.

Так как в самом общем случае связь колеса с дорогой неголономна, то эти кинематические параметры являются взаимно независимыми величинами, дающими достаточное представление о характере движения колеса.

Анализ возможных соотношений вышеуказанных кинематических параметров позволил выделить пять основных кинематических режимов качения колеса: "чистое" качение, буксование, юз, пробуксовка и проскальзывание (рис. 1).

Представление о сочетании кинематических параметров, характерных для этих режимов движения колеса, дает таблица.

Численные значения линейных скоростей приняты по знаку проекции векторов V_S и V_o на продольную ось x, направленную в сторону движения колесной машины.

С точки зрения кинематики к основным следует отнести три наиболее простых режима дви-

gz118.indd 23 20.12.2017 8:26:47

Рис. 1. Основные режимы качения автомобильного колеса

Основные режимы качения автомобильного колеса

Режим движения	Параметры движения		
	ω	V_o	V_S
"Чистое" качение	$\omega > 0$	$V_o > 0$	$V_S = 0$
Буксование	$\omega > 0$	$V_o = 0$	$V_S < 0$
Юз	$\omega = 0$	$V_o > 0$	$V_S > 0$
Пробуксовка	$\omega > 0$	$V_o > 0$	$V_S < 0$
Проскальзывание	$\omega > 0$	$V_o > 0$	$V_S > 0$

жения колеса: "чистое" качение, буксование и юз колеса. Два других режима ("пробуксовка" и "проскальзывание") представляют собой соответствующее сочетание первых трех. Так, например, качение с пробуксовкой ($\omega > 0$, $V_o > 0$, $V_S < 0$) можно рассматривать как комбинацию "чистого" качения ($\omega > 0$, $V_o > 0$, $V_S = 0$) с буксованием ($\omega > 0$, $V_o = 0$, $V_S < 0$), а качение с проскальзыванием ($\omega \neq 0$, $V_o > 0$, $V_S > 0$) — как сочетание "чистого" качения с юзом ($\omega = 0$, $V_o > 0$, $V_S > 0$).

Рассмотрим каждый из выделенных режимов качения.

"Чистое" качение

Под "чистым" качением автомобильного колеса следует понимать такой процесс качения, при котором в пятне контакта шины с дорогой отсутствует продольное скольжение, т. е. одновременное перемещение всех точек протектора шины, находящихся в зоне контакта, относительно дорожной поверхности. Другими словами, "чистое" качение — это качение колеса при наличии только упругого проскальзывания, которое неизбежно при взаимодействии пневматической шины с дорогой [4].

Данный режим — это наиболее характерный режим качения всех колес автомобиля. При таком режиме $\omega > 0$ и $V_o > 0$, а скольжение протектора

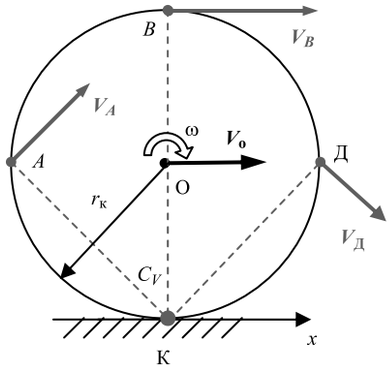


Рис. 2. Скорости точек при "чистом" качении колеса

колеса по опорной поверхности в целом отсутствует ($V_S = 0$). Следуя за Е. А. Чудаковым [1, 2], такой режим колеса можно условно рассматривать как перекатывание абсолютно жесткого диска радиусом $r_к$, имеющего одну точку К контакта с дорогой (рис. 2).

Радиус такого условного колеса принято называть радиусом качения [3], или кинематическим радиусом. Его величина определяется формулой:

$$r_к = \frac{V_o}{\omega}. \quad (1)$$

Точка К контакта такого колеса с опорной поверхностью является единственной и может рассматриваться как мгновенный центр его скоростей (C_V), а движение самого колеса как мгновенный поворот вокруг этого центра. При таком режиме движения вектор скорости любой точки колеса направлен перпендикулярно лучу, проведенному из центра C_V (в данном случае совпадающем с точкой К) в эту точку, а модуль скорости прямо пропорционален расстоянию между двумя указанными точками:

$$V_A = \omega C_V A,\ V_Б = \omega C_V B,\ V_Д = \omega C_V Д \text{ и т. д.} \quad (2)$$

При "чистом" качении возможны три частных случая движения: равномерное, качение с ускорением и качение с замедлением. Отметим, что характер распределения скоростей движения материальных точек колеса при этом не зависит от режима изменения скорости, т. е. он таков же, как при равномерном движении. Однако распределение ускорений точек колеса в трех указанных случаях различно.

При равномерном движении колеса (V_o = const), линейное ускорение оси вращения w_o и угловое ускорение ε отсутствуют ($w_o = 0$, $\varepsilon = 0$), а все материальные точки колеса испытывают только

gz118.indd 24 20.12.2017 8:26:47

осестремительные ускорения, вектора которых направлены к центру (рис. 3). При этом центр C_w ускорений лежит на оси О вращения колеса.

Картину распределения ускорений различных точек колеса в случае его ускоренного движения (разгона) дает рис. 4.

В отличие от равномерного движения, мгновенный центр C_w ускорения располагается вне оси колеса и смещен вниз и по направлению ускорения оси w_o. При этом векторы ускорений всех точек колеса направлены под углом μ, к лучам, проведенным из мгновенного центра ускорений к точкам.

Тангенс этого угла определяется по формуле

$$\mathrm{tg}\mu = \varepsilon/\omega^2. \quad (3)$$

Модуль ускорения любой материальной точки колеса, например точки A, прямо пропорционален ее удалению от мгновенного центра C_w ускорения:

$$w_A = AC_w\sqrt{\varepsilon^2 + \omega^4}. \quad (4)$$

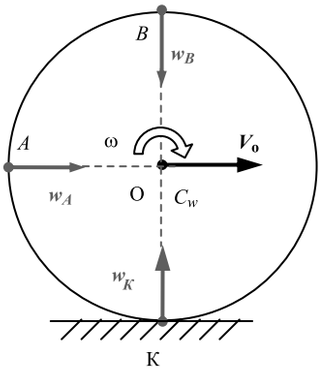


Рис. 3. Ускорения точек при равномерном движении колеса:
$\varepsilon = 0$; $w_o = 0$

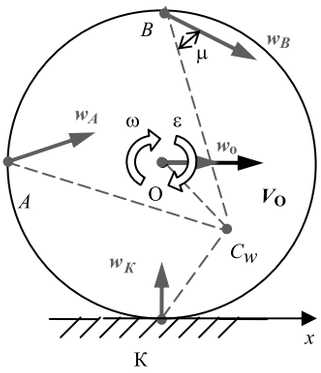


Рис. 4. Ускорения точек колеса при его разгоне:
$\varepsilon > 0$; $w_o > 0$

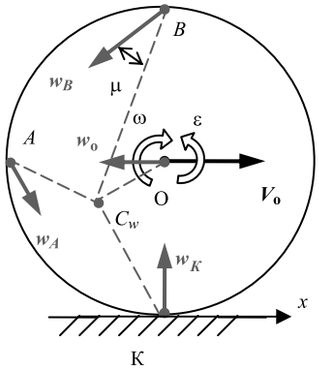


Рис. 5. Ускорения точек колеса при замедлении:
$\varepsilon < 0$; $w_o < 0$

При замедленном движении колеса картина распределения ускорений точек аналогична, но мгновенный центр ускорений смещен не вперед, а назад, т. е. по направлению вектора ускорения w_o оси колеса (рис. 5).

Буксование

Под буксованием (рис. 6) будем понимать такой процесс качения ведущего колеса, при котором все элементы шины в зоне ее контакта с дорогой находятся в продольном скольжении ($V_s < 0$), а линейная скорость оси колеса равна нулю ($V_o = 0$). Другими словами, при таком режиме колесо совершает вращение вокруг своей оси, оставаясь при этом на месте. Другой характерной особенностью буксования является то, что мгновенные центры скоростей (C_V) и ускорений (C_w) совпадают. При этом оба центра располагаются на оси О вращения колеса.

Буксование характерно для трогания автомобиля на скользких твердых дорогах, а также грунтовых поверхностях, создающих большое сопротивление качению при относительно малом сцеплении шины с грунтом.

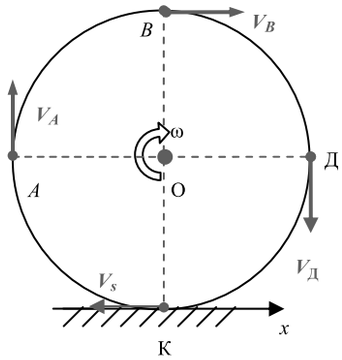


Рис. 6. Буксование

gz118.indd 25 20.12.2017 8:26:47

Скорость скольжения элементов протектора шины, находящихся при этом в центре К пятна контакта колеса, определяется угловой скоростью его вращения и расстоянием от оси до опорной поверхности, т. е.:

$$V_s \approx \omega r_д, \quad (5)$$

где $r_д$ — динамический радиус колеса.

При буксовании угловое ускорение колеса в те или иные промежутки времени в зависимости от величины крутящего момента $M_к$ может принимать как положительное ($\varepsilon > 0$), так и нулевое ($\varepsilon = 0$) или отрицательное значение ($\varepsilon < 0$). При этом кинематический радиус буксующего колеса равен нулю ($r_к = 0$).

Отметим, что введенное выше определение буксования в значительной мере отличается от того, которое сформулировано в ГОСТ 17697—72. В стандарте [3] буксование колеса трактуется чрезмерно расширено и неопределенно, а именно как "Продольное скольжение колеса, направление которого совпадает с направлением тангенциальных скоростей точек колеса в контакте". Как известно, такой режим движения возможен как при неподвижной оси вращения колеса ($V_о = 0$), так и при ее продольном перемещении ($V_о > 0$). Из кинематики же известно, что это два разных движения. Первое (вращение вокруг неподвижной оси) — это простое движение, а второе — составное, т. е. сложение вращения с поступательным движением.

Юз колеса

Под юзом будем понимать такое движение колеса, при котором все точки протектора, находящиеся в зоне контакта с дорогой, имеют продольное скольжение, численно равное скорости движения оси колеса ($V_s = V_о$). Данное движение возникает при блокировке колеса, которое характерно для экстренных (аварийных) торможений автомобилей, особенно на скользких дорогах. Отличительной особенностью этого режима является отсутствие вращения колеса ($\omega = 0$) при наличии линейной скорости движения. Такой режим является поступательным движением колеса, при котором, как известно, векторы скоростей и ускорений всех точек одинаковы (рис. 7). Так как качение отсутствует, то такой режим движения колеса можно назвать еще "чистым" скольжением. Кинематический радиус колеса при таком режиме движения бесконечен ($r_к \sim \infty$).

Введенное определение юза также отличается от того, которое приводится в ГОСТ 17697—72. В нем юз определяется как "Продольное скольжение колеса, направление которого противоположно направлению тангенциальных скоростей точек колеса в контакте". Однако такой режим возможен как при наличии угловой скорости вращения колеса ($\omega > 0$), так и при ее отсутствии ($\omega = 0$). При этом скольжение колеса при $\omega = 0$ — это простое движение, которое называется поступательным, а скольжение при $\omega > 0$ — это составное, называемое плоскопараллельным. Таким образом, в определение юза колеса, которое содержится в ГОСТ 17697—72, заложена излишняя широта и кинематическая неопределенность.

Пробуксовка

Такой режим качения характерен только для ведущих колес и возникает в основном при разгонах автомобиля. Возникновение пробуксовки объясняется избыточной величиной крутящего момента, который не может уравновесить момент реакции опорной поверхности вследствие ограниченности сил трения в пятне контакта.

При пробуксовке (рис. 8) вектор скорости продольного скольжения (V_S) противоположен по направ-

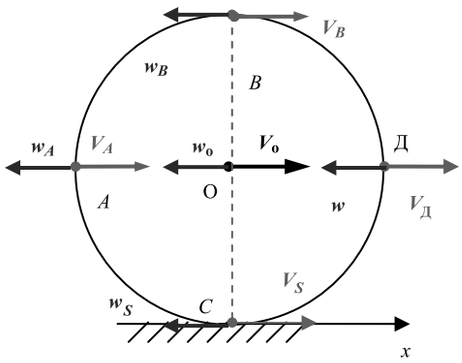


Рис. 7. Юз колеса

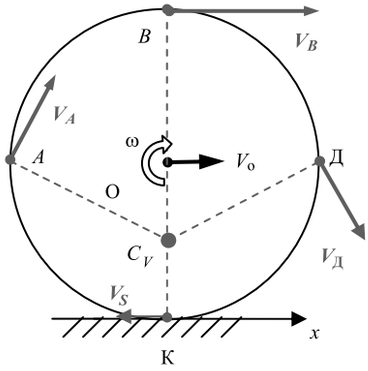


Рис. 8. Качение с пробуксовкой

gz118.indd 26 20.12.2017 8:26:48

лению вектору линейной скорости оси колеса ($V_о$). При этом величина скорости пробуксовки (скольжения) колеса по опорной поверхности определяется формулой [5]:

$$V_S = \omega(r_д - r_к). \quad (6)$$

В результате пробуксовки колесо теряет часть своей поступательной скорости движения, а угловая скорость вращения ω колеса становится больше той, которая бы имела место при "чистом" качении.

Как видно из рис. 8, при качении с пробуксовкой мгновенный центр скоростей колеса (если его условно рассматривать как твердое тело) поднимается над опорной поверхностью и приближен к оси вращения. В результате этого кинематический радиус $r_к$ колеса становится меньше аналогичного радиуса этого же колеса, совершающего "чистое" качение.

Качение колеса с пробуксовкой сочетается в основном с его линейным ускорением. При этом ($\varepsilon > 0$, $w_о > 0$). Однако возможны и такие режимы качения, когда угловое ускорение колеса $\varepsilon = 0$ и $\varepsilon < 0$.

Проскальзывание

Данный режим качения характерен для торможений, когда сумма тормозного момента, подводимого к колесу, и момента сопротивления качению M_f, превышает момент сил трения, возникающих при взаимодействии колеса с опорной поверхностью. При качении с проскальзыванием вследствие действия тормозного момента угловая скорость вращения "отстает" от скорости, при которой качение колеса является "чистым", а вектор скорости скольжения V_S направлен по ходу движения (рис. 9). Мгновенный центр C_V скоростей такого колеса (если его рассматривать как твердое тело) смещается вглубь опорной поверхности, т. е. он удаляется от оси вращения. Соответствующим образом возрастает и радиус качения $r_к$ колеса, который при проскальзывании всегда больше его динамического радиуса $r_д$, а также радиуса качения этого же колеса, если бы имело место "чистое" качение.

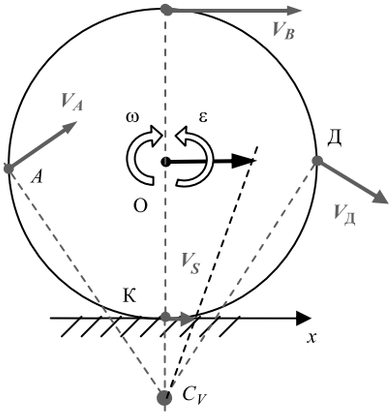


Рис. 9. Качение с проскальзыванием

Величина скорости проскальзывания V_S может быть вычислена по формуле [5]:

$$V_S = \omega(r_к - r_д). \quad (7)$$

При таком режиме снижение угловой скорости вращения колеса по сравнению с режимом "чистого" качения можно оценить посредством формулы:

$$\Delta\omega = V_о(r_к - r_д)/r_д r_к. \quad (8)$$

Качение колеса с проскальзыванием сочетается, как правило, с его угловым и линейным замедлением ($\varepsilon < 0$, $w < 0$).

Разработанная классификация кинематических режимов движения автомобильного колеса дополняет известную классификацию силовых (нагрузочных) режимов работы, что в целом дает достаточно полное и ясное представление о типичных режимах работы автомобильного колеса как с силовой, так и с кинематической точки зрения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Чудаков Е. А.** Качение автомобильного колеса // Труды Автомобильной лаборатории ИМ АН СССР, вып. 9. — М.-Л.: Изд. АН СССР, 1948. — 200 с.
2. **Чудаков Е. А.** Качение автомобильного колеса. — М.: Машгиз, 1947. — 70 с.
3. **ГОСТ 17697—72** Автомобили. Качение колеса. Термины и определения.
4. **Копотилов В. И.** Аналитическое исследование проскальзываний упругой шины при качении колеса по жесткой основе // Механика и процессы управления: Материалы Всероссийской научно-практической конференции (г. Тюмень, 22 апреля 2015 г.). — Тюмень, 2015. — С. 46—53.
5. **Копотилов В. И.** Силовые и кинематические закономерности качения колеса с пневматической шиной // Механика и процессы управления. Том 1. Материалы XXXXV Всероссийского симпозиума, посвященного 70-летию Победы. — М.: РАН, 2015. — С. 123—132.

gz118.indd 27 20.12.2017 8:26:48

УДК 539.379

В. С. Антипенко, канд. техн. наук, e-mail: antipenkovs7@mail.ru,
С. Г. Афанасьев, канд. физ.-мат. наук, Московский государственный университет транспорта, РУТ (МИИТ), **А. А. Строев,** научный сотрудник лаборатории сварки и пайки отделения инновационных реакторных материалов и технологий АО "ГНЦ РФ-ФЭИ", e-mail: aastroev@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ЭРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ВОЛЬФРАМОВЫХ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ЭЛЕКТРОДОВ НА ИХ СВОЙСТВА

Рассмотрены поверхностные явления, протекающие в процессе работы высоконагруженных электродов. Проведен анализ диффузии и испарения легирующих добавок в процессе длительной работы электродов. Установлены закономерности твердофазного взаимодействия между основой и легирующими добавками, время обеднения матрицы присадками.

Ключевые слова: *электрод, диффузия, электросопротивление, плотность, легирование, эрозия.*

The model of structural changes of electrodes in the course of their work is proposed. The phenomena have been considered occuring on the surface of cathodes in the course of their operation. The analysis has been carried out of diffusion and evaporation of the alloying elements in the course of long-term operation of electrodes. Regularities have been obtained of solid-phase interaction between the basis and alloying elements, as well as the time of alloying elements de-enrichment of matrix.

Keywords: *electrode, diffusion, thermal stability, electroresistance, density, alloying, erosion.*

Для изготовления высокотемпературных электродов, работающих в инертной среде, в качестве основы главным образом используют вольфрам, легированный различными присадками, способствующими повышению эрозионной стойкости, жаропрочности и термоэмиссии [1].

Значительная величина силы тока I дугового разряда ($I > 1$ кА), относительно низкое напряжение горения и низкое катодное падение потенциала V ($V \leqslant 20$В), высокие значения плотности тока J у поверхности катода ($J \sim 10^6$ А/Ом^2) и температуры газоразрядной плазмы электрической дуги приводят к исключительно большим тепловым нагрузкам на электроды (рис. 1).

Наиболее стойкими из используемых сегодня электродов в среде аргона являются электроды из итрированного вольфрама (с содержанием оксидной добавки 1,8—3,5 %). В результате длительной работы происходит разрушение катодов путем эрозии и расплавления, что вызывает загрязнение плазменной струи и, соответственно, обрабатываемого материала, ограничивает ресурс непрерывной работы плазменной установки, снижает качество изделий и производительность труда (на рис. 2 показаны вольфрамовые электроды с оплавлениями).

В связи с этим проблема создания электродов, способных сохранять длительное время свои термостойкие и эмиссионные свойства, приобретает большое значение. Однако, если успехи в решении проблем повышения жаропрочности, прочностных и эмиссионных свойств значительны, то изучению повышения эрозионной стойкости легированных тугоплавких металлов посвящено относительно мало работ.

Как показано в ряде работ [1—3], увеличения эрозионной стойкости легированных металлов можно добиться усложнением составов твердых

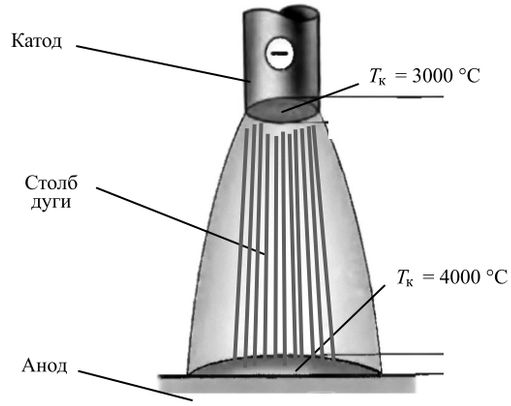


Рис. 1. Схема тепловой нагрузки на работающий электрод во время плазменной сварки прямого действия

gz118.indd 28 20.12.2017 8:26:48

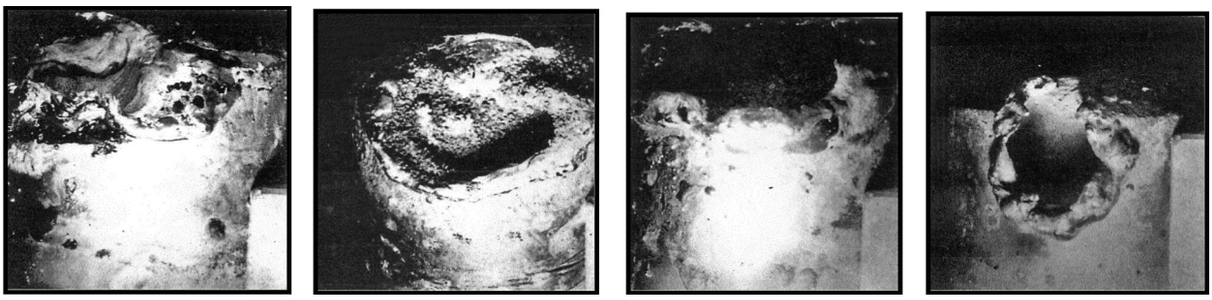


Рис. 2. Отработавшие вольфрамовые электроды

растворов и введенных в них вторых фаз. Проблема увеличения эрозионной стойкости при высоких температурах связана с решением вопросов твердофазного взаимодействия между матрицей и легирующими добавками. Однако и без усложнения гетерогенезации структуры сплавов катодов удалось продлить срок службы при помощи оптимизации их геометрии [4].

В работе [5] было отмечено, что увеличение плотности катодного материала (чистого вольфрама и чистого молибдена) на 15 % повышает его термостойкость на 30 %. Но твердофазное взаимодействие и поверхностные явления, протекающие в процессе работы легированных электродов, еще до конца не изучены, поэтому представляет интерес рассмотрение влияния деформации электродов при изготовлении в качестве технологического приема по улучшению работоспособности вольфрамовых катодов.

Целью настоящей работы является определение влияния деформации легированных вольфрамовых электродов при изготовлении на их свойства и структурные изменения и выявление оптимальных степеней деформации для повышения эрозионной стойкости электродов.

В классических работах Лэнгмюра, а впоследствии и других исследователей [6], было показано, что при адсорбции на поверхности металла атомов или ионов постороннего вещества, существенно меняется работа выхода основы, причем при соответствующем подборе материала катода можно получить значительное увеличение эмиссионного тока.

По теории Лэнгмюра, адсорбированный на поверхности электрода атом электроположительного металла, поляризуется адсорбционными силами и обращается в электрический диполь, направленный к поверхности электрода отрицательным полюсом. Совокупность таких диполей образует двойной электрический слой. Образуется скачок потенциала и работа выхода электрона электрода, покрытого слоем атомов электроположительного металла, изменяется на величину $\Delta\varphi$. На рис. 3 схематично изображено уменьшение работы выхода электрона вольфрама, покрытого пленкой атомов тория адсорбированного вещества.

Анализ имеющихся теоретических и экспериментальных исследований термокатодов [7—15] позволяет предложить модель структурных изменений электродов, основанную на положениях теории активированного катода Лэнгмюра. Отвод энергии от рабочего торца внутрь катода путем теплопроводности вызывает разогрев внутренних частей катода, при этом происходит диссоциация тугоплавких соединений. Под действием градиентов химического и электрохимического потенциалов происходит диффузия растворенных атомов с последующей их адсорбцией на рабочем торце, что приводит к снижению работы выхода электронов с поверхности катодов. Высокие температуры приводят к испарению активированных атомов с поверхности катода, а их недостаток

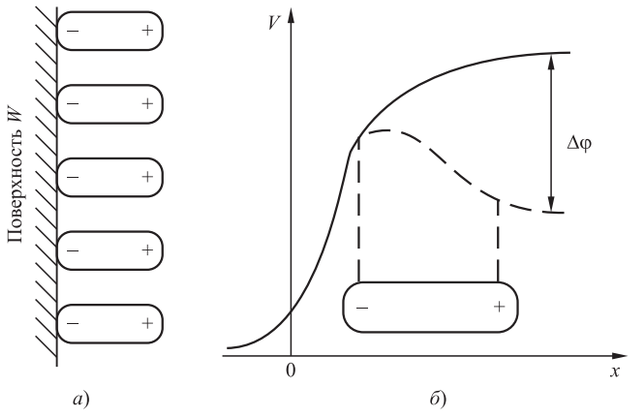


Рис. 3. Образование дипольного монослоя (*а*) и соответствующее снижение работы выхода электронов торированного вольфрама (*б*) по Лэнгмюру

gz118.indd 29 20.12.2017 8:26:48

восполняется за счет диффузии из внутренних областей. В процессе длительной работы катода область диссоциации тугоплавких соединений передвигается вглубь катода, что приводит к ускорению роста зерен матрицы и, в свою очередь, к замедлению скорости зернограничной диффузии. Подпитка поверхности катода только за счет объемной диффузии недостаточна, и наступает нарушение массобаланса эмиссионно-активных элементов, что способствует возрастанию значений работы выхода электрона на поверхности, повышению ее температуры, расплавлению и выходу электрода из строя.

Таким образом, в процессе работы электродных материалов происходит диффузия атомов легирующих элементов к поверхности образца, т. е. адсорбция атомов из внутренних областей. Причем испарившиеся атомы ионизируются в прикатодной области и в виде ионов возвращаются на катод, что обеспечивает создание металлопленочной системы, несмотря на уменьшение скорости подпитки поверхности электрода атомами легирующих компонентов за счет диффузии, что подтверждается рядом экспериментальных данных.

Необходимо также отметить, что в случае самокалящихся электродов, время обеднения матрицы легирующим компонентом будет зависеть не только от температуры поверхности электрода, но и от распределения температуры по его длине (в отличие от электродов электронных приборов, у которых $\Delta T \approx 0$). Отсюда следует, что при работе самокалящихся электродов на определенном расстоянии от рабочего торца будет возникать зона, обедненная атомами легирующего компонента, граница залегания которой будет определяться градиентом температур по длине электрода, качеством и типом активирующих добавок, состоянием структуры и т. д.

Поэтому параметры диффузии и испарения с поверхности электродов атомов легирующих добавок напрямую влияют на характеристики жаропрочности и термоэмиссии, и на работоспособность электродных материалов. Параметры диффузии и испарения легирующего элемента зависят не только от состава сплава, но и от комплекса физико-механических характеристик (скорости эрозии, электро- и теплопроводности, плотности материала и др.), которые можно изменить не только термической обработкой, но и при помощи деформации при изготовлении.

На основе данных из [16] были определены значения коэффициентов активностей, скорости притока и испарения легирующих компонентов с поверхности вольфрама с учетом состояния поверхности и условий перехода испаряющегося вещества с поверхности в газовую фазу. На рис. 4 приведены скорости диффузии и испарения (V) легирующих элементов (при равенстве размеров эмиттеров) в зависимости от температуры (T).

Анализ представленных данных показывает, что в системах вольфрама с иттрием и лантаном при температурах соответственно выше 2000 K скорость испарения становится больше по сравнению со скоростью притока атомов за счет диффузии, что делает невозможным сохранение слоя атомов легирующего компонента на поверхности вольфрама и приводит к уменьшению эмиссии. В системах вольфрама с цирконием и гафнием скорость притока атомов за счет диффузии превышает скорость их испарения до более высоких температур (1700—2200 K), при этом образование слоя атомов легирующих элементов на поверхности вольфрама будет происходить быстрее, чем в системах вольфрама с редкоземельными металлами.

Для изучения физико-химических свойств сплавов на основе вольфрама и проведения раз-

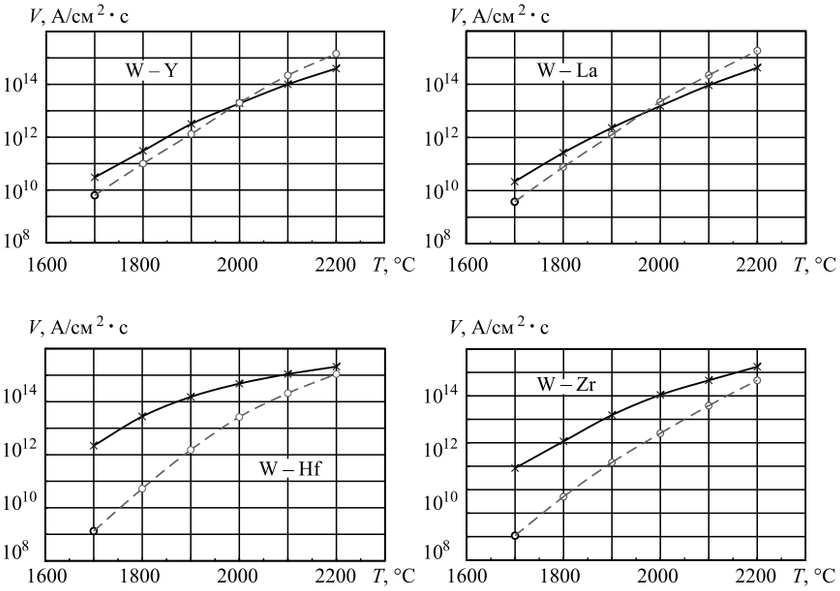


Рис. 4. Скорости (V) притока к поверхности вольфрама и испарения атомов легирующих элементов в зависимости от температуры (T):
(○—○) — испарение; (×—×) — диффузия

gz118.indd 30 20.12.2017 8:26:48

Таблица 1

Маркировка, состав и свойства спеченных сплавов на основе вольфрама

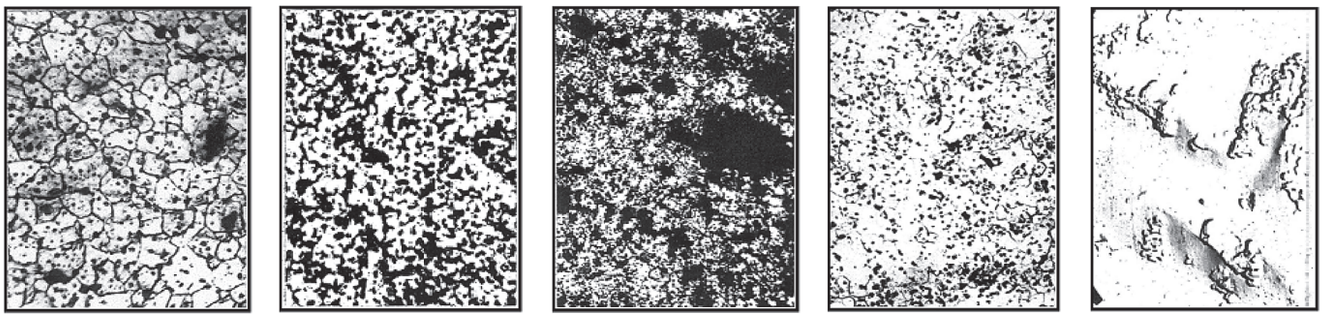
Сплав	Легирующие добавки, % по массе	Объемная доля включений *f*, (%)	Плотность ρ, г/см^3		Пористость, %	Удельное электросопротивление ρ = 1/σ, мкОм·см	
			теор.	эксп.		теор.	эксп.
ВИ5	0,4—0,7 Y_2O_3	1,9	19,03	18,27	4	5,92	5,95
ВИ10	0,8—1,1 Y_2O_3	3,7	18,77	17,91	4,5	6,16	6,2
ВИ15	1,3—1,5 Y_2O_3	5,5	18,52	17,65	4,7	6,38	6,42
ВИ20	1,9—2,2 Y_2O_3	8,5	18,2	17,26	5,16	6,74	6,8
ВИ25	2,3—2,5 Y_2O_3	9	18,02	16,7	6,3	7,01	7,25
ВИ30	2,9—3,2 Y_2O_3	11,5	17,37	16,05	7,6	7,49	7,7
ВЛ15	1,2—1,5 La_2O_3	4,8	18,75	17,57	6,3	6,42	6,8
ВИб15	1,2—1,5 YB_6	7,3	18,16	15,2	9,0	7,15	8,0
ВГМ15-5	1—3 HfO_2 5—10 Mo	5,89	18,48	17,64	4,5	6,45	6,67
ВЦН15	1,5 ZrN	4,46	18,72	17,58	6,1	6,47	6,74

личных исследований, в том числе влияния деформации, были подготовлены сплавы, представленные в табл. 1. Сплавы указанных композиций были приготовлены методами порошковой металлургии с механическим перемешиванием, гидропрессованием и косвенным спеканием в индукционных электропечах. Полученные прутки d = 18 мм, l = 62 ± 1 мм подвергались токарной обработке, в результате которой получали катоды с размерами d = 16 мм, l = 60 мм.

Исследование физико-механических свойств сплавов, а также металлографический анализ проводились на образцах различной конфигурации, вырезанных электроэрозионным способом из полученных электродов. При этом свойства катодных материалов исследовались как в исходном, так и в деформированном состояниях.

На рис. 5 представлены результаты металлографического анализа сплавов на основе вольфрама с различными легирующими добавками.

Анализ приведенных данных показал, что частицы второй фазы размером около микрона (рис. 5, табл. 2) располагаются как по границам, так и по телу зерен, имеющих полиэдрическую форму с извилистыми границами. При этом состав второй фазы и ее морфология сильно влияют



а) *б*) *в*) *г*) *д*)

Рис. 5. Микроструктура сплавов вольфрама в спеченном состоянии (×340):
а — ВИ15; *б* — ВЛ15; *в* — ВИб15; *г* — ВГМ15-5; *д* — ВИ15 (×4750)

gz118.indd 31 20.12.2017 8:26:48

Таблица 2

Результаты стендовых испытаний вольфрамовых катодов в инертной атмосфере

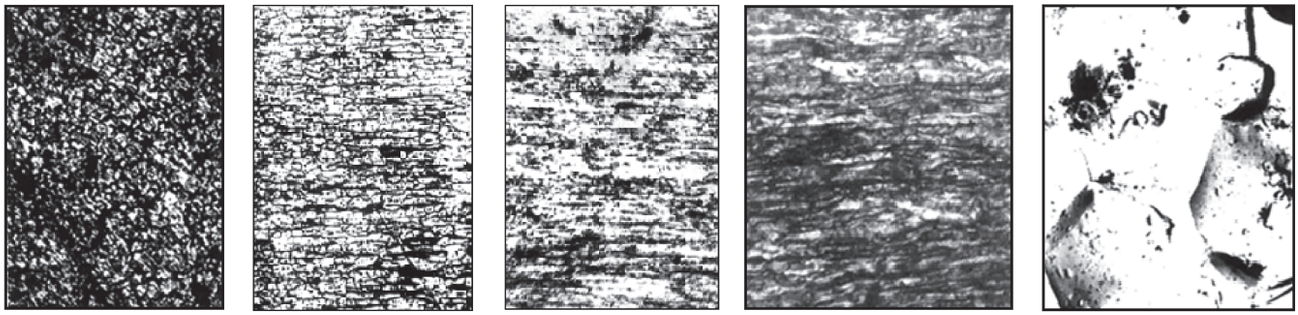
№ п/п	Сплав	Сила тока I_{max}, кА	Время работы $\tau_{раб}$, мин	Температура рабочего торца T, °С	Работа выхода электрона φ,ЭВ	Эрозия, мг/А·ч	Состояние катода после испытаний
1	ВИ5	0,8	42	3290	3,73	0,29	Сильное оплавление рабочего торца. Не пригоден для дальнейшей эксплуатации
2	ВИ10	0,8	38	—	—	0,14	Небольшой расплав. Пригоден для дальнейшей эксплуатации
3	ВИ15	0,8	65	3050	2,91	0,05	Оплавлений и трещин рабочего торца нет. Пригоден для дальнейшей эксплуатации
4	ВИ20	0,8	65	3070	2,98	0,06	Оплавлений и трещин рабочего торца нет. Пригоден для дальнейшей эксплуатации
5	ВИ20 (без дефции)	0,8	57	3095	3,03	0,07	Небольшой расплав. Пригоден для дальнейшей эксплуатации
6	ВИ25	0,8	56	—	—	0,07	Трещины. Не пригоден для дальнейшей эксплуатации
7	ВИ30	0,8	30	3120	3,12	0,07	Трещины. Не пригоден для дальнейшей эксплуатации
8	ВИб15	0,6	6	—	—	—	Сильное оплавление рабочего торца. Для дальнейшей эксплуатации не пригоден
9	ВЛ15	0,7	22	—	—	0,1	Оплавление рабочего торца. Для дальнейшей эксплуатации не пригоден

на особенности структуры сплавов. Так, в сплаве на основе вольфрама, легированного гексаборидом иттрия, наблюдались крупные, сообщающиеся поры (рис. 5, *в*), для остальных сплавов была характерна мелкая, рассеянная пористость (рис. 5, *а*, *б*, *г*).

Отмеченные различия в структуре спеченных сплавов на основе вольфрама приводят к их неодинаковым физико-механическим характеристикам в исходном состоянии. Хотя все материалы имели значения плотности, отличающиеся от теоретической (см. табл. 1), что характерно для спеченных материалов и указывает на наличие пористости, однако наибольшие значения пористости наблюдались для сплава вольфрама с гексаборидом иттрия. При этом данные измерения удельного электросопротивления и значения микротвердости также показали максимальные значения этих характеристик у сплава W — 1,5 %YB_6. В соответствии с данными физико-химического анализа стабильности тугоплавких соединений в вольфрамовой матрице это указывает на более раннюю диссоциацию и последующее растворение гексаборида иттрия в основе (уже на стадиях спекания), в отличие от других соединений, стабильность которых в вольфрамовой матрице выше.

На рис. 6 представлены фотографии микроструктур сплава ВИ15 со степенью деформации 10, 35 и 55 % и сплава ВИ5 со степенью дефор-

gz118.indd 32 20.12.2017 8:26:49



а) *б*) *в*) *г*) *д*)

Рис. 6. Влияние степени деформации на микроструктуру иттрированного вольфрама (×200); сплав ВИ15:
а — ξ = 10 %; *б* — ξ = 35 %; *в* — ξ = 55 %; *г* — сплав ВИ5: ξ = 90 %; *д* — фрактограмма ВИ15: ξ = 55 %

мации ξ = 90 %, а также фрактограмма ВИ15 со степенью деформации ξ = 55 %.

Как следует из приведенных данных, по мере увеличения степени деформации образцов увеличивается степень ориентированности зерен и коэффициент асимметрии их формы (рис. 6, *а*—*в*). Одновременно снижается выход годного металла, который составляет 95—97 % при ξ = 30—35 %, а при ξ = 55 % все образцы разрушались в процессе деформации, причем результаты фрактографического анализа показали наличие хрупкого интеркристаллитного разрушения (рис. 6, *д*). На образцах из сплава ВИ5 прокаткой с промежуточными отжигами была достигнута степень деформации ξ ≈ 90 %, при этом структура имела волокнистый характер с вытянутой формой второй фазы (рис. 6, *г*), что характерно для высоких степеней деформации.

Измерения электропроводности образцов показали лучшую воспроизводимость результатов при нагреве и охлаждении деформированных образцов по сравнению с недеформированными, однако наблюдалось уменьшение абсолютных значений этих характеристик при увеличении степени деформации свыше ξ ≈ 10—15 %, несмотря на меньшую пористость. Очевидно, это связано с сильными искажениями кристаллической решетки, созданием сильно развитой сетки границ, что в совокупности оказывает большое воздействие на характеристики электропроводности сплавов по сравнению с уменьшением пористости.

В табл. 2 представлены результаты стендовых испытаний термокатодов из легированного вольфрама (деформированных со степенью ξ ≈ 10 %) в режиме повторно-кратковременных включений.

В работе [7] отмечалось, что снижение работы выхода электрона приводит к увеличению эрозионной стойкости катодного материала, однако приведенные в табл. 3 данные показывают, что эрозионная стойкость материалов является немонотонной функцией от работы выхода электрона. Кроме того, необходимо отметить также и тот факт, что в отличие от слаботочных электродов, исследуемые катоды работали на токах 0,6—0,8 кА и выходили из строя вследствие расплавления или образования трещин, а не вследствие уменьшения размеров путем эрозии. Комплексные исследования макро- и микроструктуры, фазового состава, а также результаты исследований влияния температуры и легирования на физико-механические свойства катодных материалов позволили определить причины выхода катодов из строя.

Так, например, в сплаве вольфрама с содержанием 0,5 % Y_2O_3 количество второй фазы недостаточно для сдерживания роста зерен в процессе нагрева. В свою очередь, укрупнение зерен и связанное с этим уменьшение общей протяженности их границ приводит к уменьшению количества атомов иттрия, поступающих к рабочему торцу в основном за счет граничной диффузии. Происходит значительное обеднение поверхности катода активированными атомами, значения работы выхода электронов повышаются и, следовательно, возрастает рабочая температура на торце катода, понижается эрозионная стойкость, происходит его оплавление и выход катода из строя.

В сплаве ВИ30 повышенное содержание Y_2O_3 наряду с благоприятным воздействием(уменьшение работы выхода электрона, снижение температуры рабочего торца) приводит к повышению эрозионной стойкости, при этом возникающие температурные градиенты вызывают образование трещин в катоде.

gz118.indd 33 20.12.2017 8:26:49

Сравнение работоспособности катодов из сплавов ВИ10, ВИ15 и ВИ20 показали преимущество сплава W—1,5 % Y_2O_3, что связано со структурой и благоприятным влиянием второй фазы на свойства вольфрама при оптимальном ее содержании в сплаве.

Вольфрамовые же электроды имели ярко выраженные эрозионные разрушения, заключающиеся в переносе материала с катода на анод. На поверхности катода образовался кратер диаметром 1,2 мм, а на поверхности анода — наплыв высотой 0,5 мм, при этом контактное пятно составляет 90 % площади контактной поверхности.

В связи с этим представляет интерес корректировка технологических режимов изготовления сплавов на основе вольфрама для получения более качественных катодов плавильных плазмотронов и дальнейшего использования для работ в среде аргона сплава вольфрама, легированного 1,5 % Y_2O_3.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Справочник** по конструкционным материалам: Справочник / Б. Н. Арзамасов, Т. В. Соловьева, С. А. Герасимов и др; Под ред. Б. Н. Арзамасова, Т. В. Соловьевой. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. — 640 с.
2. **Тугоплавкие металлы** — применение и свойства тугоплавких металлов / В. С. Челноков, И. В. Блинков, В. Н. Аникин, А. О. Волхонский. Учебник. — М.: Изд-во Дом МИСиС, 2011. — 114 с.
3. **Дисперсноупрочненные материалы** / К. И. Портной, Б. Н. Бабич. М.: Металлургия, 1974. — 200 с.
4. **Стрельников И. В., Коновалов А. В.** Определение оптимальной геометрии вольфрамового электрода при точечной сварке сжатой дугой // Машиностроение. — 2011. — № 6. — С. 53—57.
5. **Вольфрам и молибден** / К. Агте, И. Вацек. Пер. с чешск. — М.: Энергия, 1964. — 229 с.
6. **Эмиссионные и адсорбционные** свойства веществ и материалов / В. С. Фоменко, И. А. Подчерняева; Справочник под общ. ред. чл.-кор. АН УССР Г. В. Самсонова. — М.: Атомиздат, 1975. — 320 с.
7. **Электродные материалы** на основе тугоплавких металлов / В. М. Амосов, Б. А. Карелин, В. В. Кубышкин. — М.: Металлургия, 1976. — 224 с.
8. **Арзамасов В. Б., Смирнова Э. Е.** Принцип жаропрочного легирования и термоэмиссионные свойства сплавов // Металловедение. Термическая и химико-термическая обработка сплавов: сб. науч. тр. под ред. Б. Н. Арзамасова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. — С. 226—231.
9. **Основы термоэмиссионного** преобразования энергии / Б. А. Ушаков, В. Д. Никитин, И. Я. Емельянов. — М.: Атомиздат, 1974. — 288 с.
10. **Основы физических процессов** в плазме и плазменных установках / С. К. Жданов, В. А. Курнаев, М. К. Романовский, И. В. Цветков; Под ред. В. А. Курнаева. — М.: МИФИ, 2007. — 368 с.
11. **Низкотемпературная плазма.** Том 10. Теория и расчет приэлектродных процессов / И. Г. Паневин, В. И. Хвесюк, И. П. Назаренко, А. М. Зимин, В. Н. Аникеев, А. С. Коротеев. Отв. ред. И. Г. Паневин, В. И. Хвесюк. — Новосибирск: Наука, Сиб. издат. фирма, 1992. — 197 с.
12. **Диффузия атомов и ионов** в твердых телах / Б. С. Бокштейн, А. Б. Ярославцев. — М.: МИСиС, 2005. — 362 с.
13. **Гаврюшенко Б. С., Пустогаров А. В.** Исследование электродов плазмотронов // Приэлектродные процессы и эрозия электродов: Сб. статей. — Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1977. — С. 85—122.
14. **Пустогаров А. В.** Экспериментальные исследования тугоплавких катодов плазмотронов // Экспериментальные исследования плазматронов. — Новосибирск: Наука. 1977. С. 315—340.
15. **Физическое материаловедение.** Том 3. Методы исследования структурно-фазового состояния материалов / Н. В. Волков, В. И. Скрытный, В. П. Филиппов, В. Н. Яльцев. Под ред. Б. А. Калина. — М.: МИФИ, 2008. — 808 с.
16. **Термодинамические свойства** неорганических веществ. Справочник / У. Д. Верятин, В. П. Маширев, Н. Г. Рябцев и др.; Под общ. ред. А. П. Зефирова. — М.: Атомиздат, 1965. — 233 с.
17. **Рентгенографический и электронноптический** анализ: 2-е изд. / С. С. Горелик, Ю. А. Скаков, Л. Н. Расторгуев. — М.: Изд-во Металлургия, 1970. — 366 с.

gz118.indd 34 20.12.2017 8:26:49

ГОРОДСКОЙ ПАССАЖИРСКИЙ НАЗЕМНЫЙ ТРАНСПОРТ

УДК 656.015

М. А. Кудряшов, ГУП "Мосгортранс", аспирант МАДИ, e-mail: sparky5@yandex.ru,
Л. Ю. Маслова, дирекция обслуживания МЦК ГУП "Московский метрополитен", магистр, МАДИ, e-mail: voimasl@gmail.com

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АВТОТРАНСПОРТА (ЛИЧНОГО И ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ) В ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНЫХ УЗЛАХ

В статье проведен анализ нормативно-правового регулирования проектирования перехватывающих парковок и методических подходов к формированию системы взаимодействия личного и транспорта общего пользования. Предложена система оценки эффективности функционирования перехватывающей парковки в составе транспортно-пересадочного узла (ТПУ). Приведены основные результаты исследований полученные методами анкетирования, телефонного интервью и обработки данных автоматизированных систем.

Ключевые слова: *транспортно-пересадочный узел, перехватывающие парковки, "Парк энд райд".*

The article analyses legal regulation of the design of ride parks and the methodological approaches to the formation of a system of communication between private and public transport. A system for evaluating the performance of the park parking lot in hubs was proposed. The main results of the research have been obtained from questionnaires, telephone interviews and data processing of automated systems.

Keywords: *transport hub, Park and ride facilities, "Park and ride".*

Введение

В целях реализации программы города Москвы "Развитие транспортной системы" на 2012—2016 годы и на перспективу до 2020 года" в части подпрограммы "Создание единого парковочного пространства", необходимой для ограничения числа поездок на личном автотранспорте в центральную часть города, ГУП "Московский метрополитен", в соответствии с поручениями мэра г. Москвы данными на совещании по вопросу "Об обустройстве перехватывающих парковок в зоне станций метрополитена и на вылетных магистралях города" с 2011 г. ввел в эксплуатацию 27 перехватывающих парковок общей емкостью свыше 5200 машиномест.

Услуги по предоставлению парковочного места оказываются бесплатно при совершении двух поездок на метро по одному проездному документу, действующему в метрополитене с 6.00 до 21.30. Такое решение в части тарифного регулирования принято в целях разгрузки улично-дорожной сети (УДС) города и снижения количества транспортных средств, припаркованных на УДС в нарушение Правил дорожного движения. В дальнейшем возможно формирование новых стереотипов транспортного поведения населения, развитие инфраструктуры, служащей для организации единого парковочного пространства в г. Москве и последующего приоритетного развития транспорта общего пользования.

Перехватывающая парковка является объектом транспортной инфраструктуры Москвы, выполняющая ряд функций, предусмотренных государственной политикой в области развития транспорта общего пользования.

1. Транспортная функция: перехватывающие парковки расположены в шаговой доступности до станций метрополитена и являются упрощенной моделью ТПУ; значительная часть пользователей в дневное время пользуются парковкой с целью дальнейшей пересадки на транспорт общего пользования.

2. Социальная функция: тарифная политика, способствующая формированию новых транспортных стереотипов поведения населения.

gz118.indd 35 20.12.2017 8:26:49

Высокие требования, предъявляемые к устанавливаемому оборудованию и программному обеспечению в части надежности и безопасности, позволяют повысить качество транспортных услуг при пересадке с личного транспорта на транспорт общего пользования.

3. Хозяйственная функция: обеспечение размещения свыше 5000 автомобилей.

4. Градостроительная функция: перехватывающие парковки позволяют эффективно эксплуатировать территорию возле станций Московского метрополитена, решая проблемы неорганизованной парковки, ведения несанкционированной торговли, складирования мусора и пр.

Анализ нормативно-правового регулирования основных этапов проектирования перехватывающих парковок

Планирование работы перехватывающих парковок вблизи станций метрополитена можно разделить на несколько этапов.

1. Планирование и определение места расположения перехватывающей парковки, анализ конфигурации УДС и системы организации дорожного движения на прилегающей территории, оценка расстояния до остановок транспорта общего пользования, наличия и величины свободных территорий, расчет потребного количества машиномест, анализ наличия вблизи организованных парковок, а также иных точек тяготения и пр.

2. Подбор парковочного оборудования, подготовка высокопрофессионального персонала, организация технической поддержки и программного обеспечения.

3. Оценка экономических показателей парковки.

4. Оценка заполняемости парковки по дням недели, времени суток, составу паркующихся, анализ ее эффективности с помощью натурных исследований, социологических опросов, оценка транспортного эффекта на прилегающих дорожных магистралях.

В соответствии с Постановлением Правительства Москвы от 13.11.2012 г. № 636-ПП "О размещении и установке на территории города Москвы объектов, не являющихся объектами капитального строительства, и о предоставлении земельных участков для целей, не связанных со строительством" перехватывающие парковки являются объектами некапитального строительства.

Критерии отнесения объектов к некапитальным объектам (движимому имуществу), порядок технического учета в бюро технической инвентаризации и ФГУП "Ростехинвентаризация", регистрации в Едином государственном реестре прав на недвижимое имущество и сделок с ним и ограничения на их размещение утверждены в [1].

Выбор участка для размещения перехватывающей парковки осуществляется комиссией с участием причастных структур на территории, тяготеющей к действующей либо строящейся станции метрополитена. Основными принципами размещения парковки являются:

— шаговая доступность до станции метрополитена (не более 500 м);

— предполагаемая вместимость не менее 100 машиномест (уточняется в ходе проектирования);

— удаленность от фасадов жилых домов в соответствии с требованиями СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200—03 "Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов" (для парковок вместимостью от 101 до 300 машиномест — не менее 35 м, для парковок вместимостью свыше 300 машиномест — не менее 50 м);

— отсутствие обременений земельного участка (действующие договоры долгосрочной аренды, особый статус территории (природный комплекс, природно-исторический комплекс и др);

— отсутствие охранных зон инженерных сетей, режим эксплуатации которых исключает размещение объектов некапитального строительства, и пр.;

— конфигурация и режим организации дорожного движения на прилегающей УДС, позволяющей организовать въезд и выезд с/на парковку, а также пожарный выезд;

Земельный участок для размещения перехватывающей парковки предоставляется Московскому метрополитену департаментом земельных ресурсов г. Москвы на условиях срочной аренды на срок 11 мес. 28 дней, с возможностью дальнейшей пролонгации на равный срок.

В ходе предпроектных изысканий проводятся натурные обследования участка, геодезические изыскания, инженерно-геологические изыскания, заказ инженерно-топографического плана участка в ГУП "Мосгоргеотрест", получение технических условий от балансодержателей инженерных сетей, проходящих по территории планируемого строительства, с последующим согласованием размещения с причастными организациями (перечень определяется индивидуально для каждого объекта).

Требования к проектированию и размещению перехватывающих парковок в шаговой доступности до станций метрополитена утверждены в [1].

gz118.indd 36 20.12.2017 8:26:49

Проектно-изыскательные работы выполняются в строгой взаимоувязке с действующими сооружениями метрополитена.

Размещение оборудования производится с учетом расположения действующих сооружений метрополитена и обеспечения их сохранности. Прокладка коммуникаций к сооружениям и оборудованию, размещаемым на парковке, выполняется в строгом соответствии с "Техническими требованиями ГУП "Московский метрополитен" на проектирование и прокладку подземных инженерных сооружений в технической зоне расположения сооружений метрополитена в городе Москве".

При проектировании предусматривается устройство на парковке следующих сооружений и систем: павильона для размещения парковочных касс, центрального поста (эксплуатационного павильона), периферийного поста (при необходимости), ограждения, информационного табло вблизи станции метрополитена, информационной стойки, автоматической парковочной системы, систем видеонаблюдения, громкоговорящего оповещения, наружного освещения, места размещения пожарных щитов, контейнера для мусора, веломодуль (опционально).

Количество въездных групп конкретной перехватывающей парковки зависит от ее потребной пропускной способности. При необходимости въездная группа должна работать на выезд, в режиме реверса. Шлагбаум должен обеспечивать непрерывную работу 24 ч в сутки 7 дней в неделю. Скорость открытия шлагбаума не должна превышать 1,6 с. Шлагбаум должен иметь функцию отстрела стрелы при наезде.

Кроме перечисленного технологического оборудования перехватывающие парковки оснащаются бытовым оборудованием и снабжаются расходными материалами для обеспечения их бесперебойного функционирования. Осуществляется уборка территории, вывоз мусора, обслуживание туалетных кабин, поставка воды.

Также к проектной организации предъявляются требования по прохождению независимой экспертизы документации и по осуществлению авторского надзора в течение всего периода выполнения работ по обустройству и оснащению оборудования парковки.

После согласования и утверждения заказчиком проектно-сметной документации строительная организация разрабатывает проект производства работ и согласует его с Московским метрополитеном. Производство работ по прокладке кабельных линий в действующих сооружениях метрополитена ведется в присутствии технического надзора Службы тоннельных сооружений метрополитена и Службы электроснабжения метрополитена в соответствии с издаваемым совместным приказом по метрополитену и строительной организации.

Моделирование транспортной ситуации производится с целью обеспечения пропуска ожидаемых потоков и безопасности путей следования пешеходов на вышеуказанном участке УДС. Исходными данными для моделирования транспортной ситуации являются генеральный план и материалы изысканий, проводимых проектной организацией.

При проектировании движения транспорта анализируется размещение парковки относительно улично-дорожной сети, организация движения и его средняя интенсивность. В дальнейшем проектируется размещение въездов и выездов с учетом предельной пропускной способности паркирующих модулей, возможность применения реверсивных модулей, размещения разделительных островков безопасности (рефьюжей), необходимого количества модульных систем, установка информационных указателей, нанесение дорожной разметки и разметки машиномест на территории парковки. Также рассматривается возможность реорганизации движения на данном участке улично-дорожной сети, установка дополнительных дорожных знаков (согласовывается с префектурой административного округа г. Москвы по принадлежности, ГИБДД, ГКУ "Центр организации дорожного движения").

На основании моделирования транспортной ситуации и последующего анализа модели выбирается предпочтительная схема организации движения с учетом требований Федерального закона от 10.12.1995 г. № 196-ФЗ "О безопасности дорожного движения", СНиП 21-02—99 "Стоянки автомобилей", СНиП III-10—75 "Благоустройство территорий" и др Выбранная схема согласовывается с Департаментом транспорта и развития дорожно-транспортной инфраструктуры г. Москвы, ГИБДД, ГКУ "ЦОДД", ГУП "Мосгортранс" и служит исходным документом для разработки проекта организации движения, включающего: пояснительную записку, ведомость согласований, общие данные (принимаются на основании моделирования транспортных потоков), ведомость дорожных знаков и указателей, ведомость объемов работ и чертежи.

Дорожные знаки устанавливаются на стойках, мачтах освещения или растяжках с обеспечением

gz118.indd 37 20.12.2017 8:26:49

их видимости в ночное время. Высота установки знаков на опоре — не менее 2 м. Конструкция дорожной одежды на парковках, подъездах и тротуарах принимается по альбому конструкций дорожных одежд для г. Москвы СК 6101-05. Дорожная разметка производится по ГОСТ Р 51256—99 "Технические средства организации дорожного движения. Разметка дорожная. Типы и основные параметры. Общие технические требования" и ГОСТ 52289—2004 "Технические средства организации дорожного движения. Правила применения дорожных знаков, разметки, светофоров, дорожных ограждений и направляющих устройств".

Совершенствование методологии оценки эффективности функционирования перехватывающей парковки

Комплексные вопросы взаимодействия различных видов транспорта рассмотрены в работах [2—5].

Исследования критериев, влияющих на выбор парковки [6—8], а также дальнейший выбор вида транспорта при пересадке с личного на транспорт общего пользования в ТПУ рассмотрены в работах [8—13].

Данные были получены по результатам социологических исследований в различных городах, а также методом натурного наблюдения. Отметим, что в большинстве работ предложенные авторами методы оценки зачастую не учитывают многообразие транспорта общего пользования, работающего на данном ТПУ, а полученная эмпирическая информация о наполняемости парковки во многом не соответствует данным, полученным автоматизированными системами контроля и учета в ходе эксплуатации перехватывающих парковок.

В целях повышения точности учета критериев, влияющих на выбор вида транспорта при пересадке, необходимо проведение дополнительных социологических исследований.

Системный подход к оценке эффективности функционирования парковок выполнен в работе [14]. В ней проведена оценка эффективности функционирования с точки зрения теории массового обслуживания с учетом неравномерности загрузки и продолжительности парковки. Применение данного подхода целесообразно при оценке эффективности принимаемых планировочных решений в части расчета потребного количества машиномест. Однако предложенная методика во многом не учитывает транспортную эффективность от размещения перехватывающей парковки, что затрудняет оценку достижимости главной функции перехватывающей парковки — сокращение количества поездок в центральную часть города на личном транспорте путем пересадки на транспорт общего пользования. Следует отметить, что в работе также отсутствует учет действующего тарифного меню в дневное время.

При оценке эффективности функционирования системы перехватывающей парковки предлагается использовать методику [14] с введением дополнительных показателей, а также изменением подходка к оценке экономических показателей с учетом действующего тарифного меню.

При анализе работы системы перехватывающих парковок предлагается дополнительно оценить следующее.

1. Показатель удобства расположения перехватывающей парковки (оценка времени, затрачиваемого на подъезд к ней от ближайших вестибюлей станций метро, размещение мест посадки/высадки в ТПУ, удаленность от ближайших автомагистралей).

2. Пользовательская оценка функционирования системы перехватывающих парковок (данный показатель предлагается получить методом анкетирования).

3. Транспортный эффект от размещения перехватывающей парковки, характеризующий степень снижения нагрузки на УДС, путем оценки повышения потенциального уровня пропускной способности УДС по сравнению с первоначальным — до начала работы перехватывающей парковки.

4. Количество транзакций активации льготы — количество прибывших пользователей личного транспорта на перехватывающую парковку с целью дальнейшей пересадки на транспорт общего пользования. Данный показатель можно оценить, анализируя количество полученных транзакций за активацию льготы для пользователей личного транспорта, совершивших две поездки на метро.

По результатам анализа за последние 4 года, количество транзакций выросло с 623 246 до 890 000. При этом среднегодовое отношение количества активаций льгот к количеству машиномест за последние 4 года сократилось с 168 до 135.

Следует отметить, что на третьем году эксплуатации перехватывающей парковки количество пользователей становится постоянным, как и показатель эффективности парковки.

5. Экономия затрат времени на передвижение с использованием перехватывающей парковки и последующей пересадкой на транспорт общего

gz118.indd 38 20.12.2017 8:26:49

пользования к затратам времени на передвижение с использованием только личного транспорта.

К экономическим показателям оценки эффективности работы перехватывающих парковок метрополитена относятся:

— средний доход, приносимый системой перехватывающих парковок в единицу времени;

— доход от функционирования перехватывающих парковок в дневное время по коммерческому тарифу;

— доход, получаемый от функционирования парковок в ночное время, по ночному тарифу.

Анализ доходов от функционирования перехватывающих парковок показывает, что средний коэффициент их наполнения при использовании в дневное время по коммерческому тарифу составляет 0,05, а в ночное время — 0,18.

Задача организации парковочных мест для размещения транспорта жителей прилегающих домов в ночное время не является первоочередной для ГУП "Московский метрополитен", однако оказание такого рода услуг является дополнительным источником дохода, а также служит для снятия социальной напряженности, возникающей при начале работ по организации парковки.

Оценка функционирования системы перехватывающих парковок в Москве

Все парковки расположены в шаговой доступности от станций метрополитена (средняя удаленность от вестибюлей составляет 105 м.), однако характеризуются различными условиями размещения и различным коэффициентом заполняемости. Средняя заполняемость перехватывающих парковок в будни составляет 92 %. При этом среда и четверг являются наиболее нагруженными. Средний коэффициент наполняемости в 2016 г. составил 61,34 %, при этом на рабочие дни приходилось 81,32 %, а на выходные — 17,77 %.

Среди пользователей перехватывающих парковок был проведен социологический опрос, по результатам которого установлено, что большинство респондентов (55 %) считают количество перехватывающих парковок недостаточным. 45 % высказались за необходимость перехватывающих парковок, а 55 % — отметили их ненужность.

Основными преимуществами внедрения системы перехватывающих парковок отмечены экономия времени на передвижение (36 %) и сокращение расходов, связанных с эксплуатацией транспортного средства (62 %). Главным фактором, повлиявшим на решение оставить автомобиль на парковке является шаговая доступность до станции метро — 58 %. 24 % — отметили выгодную тарификацию, 13 % — отсутствие альтернатив и 5 % — по другим причинам.

Основным источником информирования о работе перехватывающий парковки являются сообщения на станциях метрополитена — 38 %, 25 % респондентов — узнали из других источников, 18 % — из сети Интернет, 10 % — по указателям дорожных знаков, 9 % — узнали на сайте ГУП "Московский метрополитен".

Большинство респондентов, пользующихся услугами перехватывающих парковок ГУП "Московский метрополитен", являются жителями Московской области и других областей (70,4 %), вторая категория респондентов, часто пользующихся данной услугой, — жители Москвы (25,9 %). Наименее востребованными услуги перехватывающих парковок являются у жителей близлежащих домов (3,7 %).

На такие показатели повлияла тарифная политика, имеющая четкую временную дифференциацию и учитывающая поездки, совершенные на метро в день постановки машины на парковку при отсутствии абонементов любого типа.

Так, на всех парковках дополнительно к "Базовому тарифу" в аналогичный временной интервал (с 6.00 до 21.30) действует "Коммерческий тариф". Пользователь личного транспорта, отказавшийся от услуг метро в день постановки машины, обязан оплатить время стоянки по тарифу 50 руб./час.

"Ночной тариф" действует с 21.30 до 6.00, стоимость составляет — 100 руб. за все время стоянки. Тарификация такого типа позволяет использовать перехватывающие парковки по их прямому назначению — размещение личного автотранспорта, следующего из пригорода в центр, т. е. в полном объеме выполнять функцию перехвата и не позволять использовать территорию парковки, как площадки для отстоя автотранспорта жителей близлежащих домов.

Необходимо отметить, что социальная ориентированность тарифной политики ставится во главу угла, принимая во внимание поставленные правительством Москвы задачи по формированию новых стереотипов транспортного поведения населения, созданию инфраструктуры, служащей для организации единого парковочного пространства в городе и дальнейшего развития транспортной системы.

Социальная ориентированность выражена и в наличии мест для инвалидов. Не менее 10 % общего количества машиномест предназначены для

gz118.indd 39 20.12.2017 8:26:49

маломобильных групп граждан. Часть парковок оснащена веломодулями, что позволяет учесть интересы людей, активно занимающихся спортом. Велосипеды на парковках можно оставить бесплатно на любой период времени.

Проведена оценка респондентов к действующим тарифам: 19 % отметили тарифы как низкие, 43 % — средние, 13 % — высокие, 24 % — требуют корректировки. Отношение к тарифу "Абонемент": 57 % — за, 2 % — против, 40 % — затруднились ответить.

Отметим, что большинство респондентов в целом высоко оценивают качество работы перехватывающих парковок (табл. 1).

В целях определения параметров, влияющих на выбор вида транспорта общего пользования, департаментом транспорта и развития дорожно-транспортной инфраструктуры г. Москвы, проведено телефонное интервью среди 2000 респондентов старше 18 лет, имеющих личный автомобиль, профессиональная деятельность которых не связана

Таблица 1

Оценка качества функционирования перехватывающих парковок, %

Показатели	Качество работы			
	Отличное	Хорошее	Удовлетворительное	Требует улучшения
Оборудование и инфраструктура	20	54	20	6
Содержание парковки в зимний период	18	43	30	10
Работа обслуживающего персонала	47	45	6	1
Удобство подъезда к парковке и ее доступность относительно вестибюлей метрополитена	31	51	16	2

Таблица 2

Частота пользования транспортом общего пользования, %

Показатели	Вид транспорта							
	Метрополитен	Автобус	Маршрутное такси	Такси	Пригородные электропоезда	Троллейбус	Трамвай	Велотранспорт
Выборка в целом	56	29	18	15	14	13	9	8
Жители Москвы	57	24	17	15	11	14	10	8
Жители Московской области	51	30	24	13	33	6	7	8

Таблица 3

Оценка частоты пользования за последение 6 мес., %

Показатели	Вид транспорта								
	Велотранспорт	Такси	Пригородные электропоезда	Метрополитен	Автобус	Троллейбус	Маршрутное такси	Трамвай	Личный автотранспорт
Чаще, %	61	31	21	20	20	17	15	15	12
Реже	9	16	25	14	14	18	30	22	19
Также	30	53	54	66	66	65	55	63	69

gz118.indd 40 20.12.2017 8:26:49

Таблица 4

Модели комбинирования личного транспорта и транспорта общего пользования, %

Показатели	Не пользуются личным автотранспортом	Пользуются в одной поездке личным транспортом и транспортом общего пользования	Пользуются в разных поездках личным транспортом и транспортом общего пользования	Пользуются только личным транспортом
Жители Москвы	20	9	26	45
Жители Московской области	16	19	21	44

с вождением автомобиля. Они являются жителями Москвы и прилегающих к МКАД территорий Московской области (пропорционально населению административных округов Москвы и району области). По результатам обследования установлены наиболее популярные виды транспорта общего пользования (табл. 2) и проведена оценка динамики частоты их пользования за последние 6 мес. (табл. 3).

В целях выявления основных недостатков пользования личным автотранспортом был проведен опрос в открытой форме. Полученные результаты сгруппированы по основным показателям: высокая загруженность УДС — 54 %, недостаточность парковочных мест — 21 %, стоимость парковки — 10 %, эксплуатационное состояние УДС — 4 %, стоимость владения — 22 %, прочее — 5 %.

Выявлены основные модели комбинирования личного транспорта и транспорта общего пользования в рабочие дни (табл. 4).

При осуществлении мультимодальной поездки с использованием личного и транспорта общего пользования начинают поездку на транспорте общего пользования с последующей пересадкой на личный — 5 %, начинают поездку на личном транспорте с последующей пересадкой на транспорт общего пользования — 83 %, затруднились ответить — 12 %.

Основным пунктом смены вида транспорта является перехватывающая парковка вблизи станций метрополитена (40 %).

Основными стимулами к повышению частоты поездок на транспорте общего пользования является повышение загруженности УДС (44 %), повышение качества оказываемых услуг (26 %) и повышение затрат на эксплуатацию личного транспорта (15 %), затруднились ответить (13 %). При этом 18 % не считают возможным использование транспорта общего пользования.

Дополнительно проведена оценка основных преимуществ у видов транспорта, отмеченных как преимущественные, и недостатков у наименее предпочтительных видов транспорта (табл. 5). Опрос проводится в открытой форме, результаты сгруппированы по основным показателям.

Таблица 5

Отношение удовлетворенности/неудовлетворенности различными видами транспорта общего пользования, %

Показатели	Вид транспорта					
	Автобус	Трамвай	Троллейбус	Маршрутное такси	Метрополитен	Пригородные электропоезда
Скорость передвижения	13/19	11/17	13/24	71/2	68/2	44/4
Уровень комфорта	56/38	41/20	48/20	20/41	19/65	28/39
Конфигурация маршрутной сети	29/20	18/52	43/29	15/3	27/13	20/30
Влияние загруженности УДС	14/20	43/3	4/7	2/2	26/2	42/0
Соблюдение расписания движения	7/6	5/2	4/2	1/3	22/0	19/2
Частота движения	13/23	14/3	35/6	26/5	9/0	15/16
Качество в целом	11/5	8/4	9/2	12/3	10/11	11/6
Стоимость поездки	8/3	0/0	0/1	17/14	7/9	17/7
Наполняемость салона	14/20	11/1	11/5	20/23	2/61	9/20
Маневренность	1/0	4/12	0/16	0/0	3/0	0/0

gz118.indd 41 20.12.2017 8:26:49

Выводы

Перехватывающие парковки метрополитена являются важной составляющей транспортной инфраструктуры Москвы. Опыт их организации и эксплуатации позволяет сделать вывод, что строительство единичных перехватывающих парковок на различных направлениях движения не способно решить задачу сокращения прибытия личного транспорта в центральную планировочную часть города. Анализ сложившейся ситуации позволяет выделить следующие причины низкой эффективности перехватывающих парковок.

1. Отсутствие схем комплексного размещения систем перехватывающих парковок в составе городских территорий в увязке с транспортной инфраструктурой города.

2. Недостаточность нормативно-правовой базы в части проектирования и определения основных расчетных параметров.

3. Отсутствие единой стратегии по повышению заинтересованности пользователей личного транспорта в использовании перехватывающих парковок, кроме единой тарифной политики (отсутствие комфортабельных транспортно-пересадочных узлов, наличие дополнительных сервисов на перехватывающих парковках и т. п.).

Несмотря на ряд серьезных проблем, которые необходимо решать в ходе организации системы перехватывающих парковок в Москве, был решен и ряд задач.

1. Дана оценка существующего уровня развития единого парковочного пространства в Москве в части перехватывающих парковок, с учетом ее агломерационной роли как центра расселения Московского региона.

2. Предложена техническая составляющая оборудования и управления перехватывающими парковками, включая единое программное обеспечение с парковками АМПП, совмещение с АСОП Метрополитена и транспорта общего пользования, реализована возможность использования всего спектра платежных документов, применяемых в Москве.

3. Определены приоритеты формирования системы перехватывающих парковок в части шаговой доступности от станций метрополитена.

4. Разработан и согласован перечень перехватывающих парковок с учетом очередности.

5. Определена транспортная и социально-экономическая эффективность реализации программы развития перехватывающих парковок.

6. Подготовлен проект по объединению системы парковок города Москвы (АМПП) и перехватывающих парковок Метрополитена в части оптимизации управления, корректировки затрат на их оборудование и передача в эксплуатацию Администратором Московского парковочного пространства.

Направлением дальнейших исследований является анализ критериев выбора вида транспорта и маршрута передвижения при пересадке в ТПУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Постановление Правительства Москвы** № 1139-ПП от 16 декабря 2008 года "Об утверждении Положения о размещении и установке на территории города Москвы объектов, не являющихся объектами капитального строительства". Режим доступа: http://mosopen.ru/document/1139_pp_2008-12-16
2. **Блудян Н. О.** Ифраструктурные проблемы организации таксомоторных перевозок в московском мегаполисе // В мире научных открытий. — 2015. — № 10.3 (70). — С. 1231—1239.
3. **Блудян Н. О., Айриев Р. С., Кудряшов М. А.** Методические основы управления мультимодальными пассажирскими перевозками // В мире научных открытий. — 2015. — № 10.3 (70). — С. 1249—1259.
4. **Агломерационные проблемы** организации эффективной транспортной системы / Н. О. Блудян, Е. И. Пистун, Д. Г. Мороз, П. И. Хейфиц // Автоматизация и управление в технических системах. — 2014. — № 2 (10). — С. 3—13.
5. **Блудян Н. О., Айриев Р. С.** Агломерационные подходы к решению транспортных проблем // Автотранспортное предприятие. — 2014. — № 8. — С. 2—7.
6. **Игнатьев Ю. В.** Возведение автомобильных стоянок и парковок в крупных городах // Вестник ЮУрГУ. — 2012. — № 17. — С. 68—72.
7. **Науменко Е. Ю.** Определение вариантов емкости и занятости парковок // ИВД. — 2011. — № 6. — С. 35—40.
8. **Науменко Е. Ю.** Организация парковочного пространства в общей системе дорожного движения в городах: дис. ... канд. техн. наук. Волгогр. гос. техн. ун-т. — Ростов-на-Дону, 2012. — 162 с.
9. **Данилина Н. В.** Научно-методические основы формирования системы "перехватывающих" стоянок в крупнейших городах: на примере города Москвы: дис. ... канд. техн. наук. Моск. гос. строит. ун-т. — Москва, 2012. — 187 с.
10. **Папаскуа А. А.** Совершенствование организации пассажирского автомобильного транспорта в загруженных районах городов: дис. ... канд. техн. наук. — Ростов-на-Дону, 2004. — 218 с.
11. **Parkhurst G. and Meek S.** (2014) The effectiveness of park-and- ride as a policy measure for more sustainable mobility Parking Issues and Policies. (5) Emerald Insight, pp. 185—211. Режим доступа: http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/S2044-994120140000005020
12. **Shahi Taphsir.** Exploring the model change behavior of park-and-ride users Mathematical problems in engineering. November 2014. Режим доступа: https://www.hindawi.com/journals/mpe/2015/282750/
13. **Manns J.** Park-and-Ride: politics, policy and planning Town and Country Planning Association, 2010. Режим доступа:
14. **Тарасюк Ю. В.** Повышение эффективности функционирования стоянок автомобильного транспорта: дис. ... канд. техн. наук. — Иркутск, 2004. 240 с.

gz118.indd 42 20.12.2017 8:26:49

УДК 621.43.038.044.7

А. Ю. Дунин, канд. техн. наук, доцент, МАДИ
E-mail: a.u.dunin@yandex.ru

СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ФОРМОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВПРЫСКИВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КЛАПАН ФОРСУНКИ

Снижение уровня шума и содержания оксидов азота в отработавших газах дизелей достигается многоразовым впрыскиванием в сочетании с управлением передним фронтом основного впрыскивания. В Московском автомобильно-дорожном государственном техническом университете (МАДИ) предложен вариант способа управления формой дифференциальной характеристики впрыскивания электрическим импульсом, который подается на электромагнит управляющего клапана электрогидравлической форсунки. Импульс состоит из предварительного, основного и следующего за ним дополнительного. Длительность предварительного импульса определят амплитуду начального этапа характеристики впрыскивания, а интервал между предварительным и основным импульсом — амплитуду между начальным и основным этапами характеристики впрыскивания. Интервал между основным и дополнительным электрическими импульсами подбирается таким образом, чтобы последующий этап характеристики впрыскивания начинался после окончания основного, но без интервала между ними.

Ключевые слова: *электрогидравлическая форсунка, управление формой дифференциальной характеристики впрыскивания, управляющий электрический импульс.*

Decrease of nitrogen oxide content in exhaust gases and noise level of diesel engines are provided by means of multistage fuel injection combined with control of the front edge shape of the main injection. In Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), a method of control of injection rate shape using an electric impulse was proposed which is applied to the electromagnet of the control valve of the injector of the Common Rail fuel system. The impulse consists of a primary, main and following them additional stages. Duration of the primary impulse defines the amplitude of the initial stage of the injection diagram, and the interval between the primary and main impulses — the amplitude between the initial and the main stages of the injection rate. The interval between the main and additional electric impulses is adjusted so that the post-injection stage of the injection rate should start after the end of the main stage but without any interval between them.

Keywords: *common rail injector, injection rate shaping, electric control impulse, testing of diesel fuel system.*

Введение

В настоящее время для всех двигателей устанавливаются экологические стандарты, которые сильно различаются как по количеству нормируемых токсичных компонентов, так и по их предельно допустимым уровням в зависимости от назначения двигателя. Кроме того, экологические стандарты постоянно ужесточаются.

Это приводит к необходимости совершенствования топливных систем дизелей, в частности, наиболее распространенных из них — аккумуляторных топливных систем (АТС).

Одни из основных направлений развития АТС — повышение давления впрыскивания [1—3] и обеспечение многоразового впрыскивания с заданной формой переднего фронта дифференциальной характеристики основного впрыскивания [4, 5]. Под дифференциальной характеристикой понимают зависимость массовой скорости подачи топлива $dQ/d\tau$ из распылителя электрогидравлической форсунки (ЭГФ) от времени τ.

Управление передним фронтом необходимо для более плавного нарастания давления в цилиндре дизеля, что обеспечивает снижение шума и механической напряженности деталей двигателя, уменьшает выброс NO_x.

Предлагается совершенствование способа управления характеристикой впрыскивания ЭГФ с электромагнитным клапаном [6, 7]. К достоинствам данного способа относится сохранение традиционной конструкции ЭГФ.

Предложенное МАДИ управление формой характеристики $dQ/d\tau = f(\tau)$ электрическими

gz118.indd 43 20.12.2017 8:26:49

импульсами направлено на решение одного из недостатков указанного способа — ограничения воздействия на передний фронт характеристики впрыскивания, диктуемого особенностями конструкции ЭГФ.

Описание предлагаемого способа управления формой дифференциальной характеристики впрыскивания

Предлагаемый способ поясняется результатами, полученными с использованием программного комплекса, разработанного в МАДИ для расчетных исследований рабочих процессов АТС.

Электрические импульсы, подаваемые от блока управления на электромагнитный клапан ЭГФ, состоят из двух и более предварительных и одного основного (рис. 1).

Длительность первого предварительного управляющего импульса определяет амплитуду переднего фронта первого этапа ступенчатой дифференциальной характеристики впрыскивания топлива (рис. 2).

Интервалы между управляющими импульсами при многоразовом впрыскивании подбираются таким образом, чтобы обеспечить ступенчатое впрыскивание с заданной величиной колебаний амплитуды первого этапа ступенчатой дифференциальной характеристики впрыскивания топлива (рис. 3).

Амплитуда первого этапа $dQ/d\tau = f(\tau)$ составляет 20...80 % амплитуды ее второго этапа (рис. 3). Колебание амплитуды первого этапа $dQ/d\tau = f(\tau)$ не превышает 10...15 % амплитуды второго этапа (рис. 3).

Экспериментальная установка

Оценка формы дифференциальной характеристики впрыскивания проведена на испытательном комплексе для исследований рабочих процессов дизельных двигателей и их топливных систем с электронным управлением.

Для получения $dQ/d\tau = f(\tau)$ на различных режимах работы ЭГФ 4 применен безмоторный исследовательский стенд (рис. 4), входящий в испытательный комплекс.

Стенд состоит из станины *6*, на которой установлен топливный насос высокого давления *2*, приводимый от электродвигателя *1* (мощность 11 кВт; максимальная частота вращения 1445 мин$^{-1}$) с регулятором частоты вращения *5*.

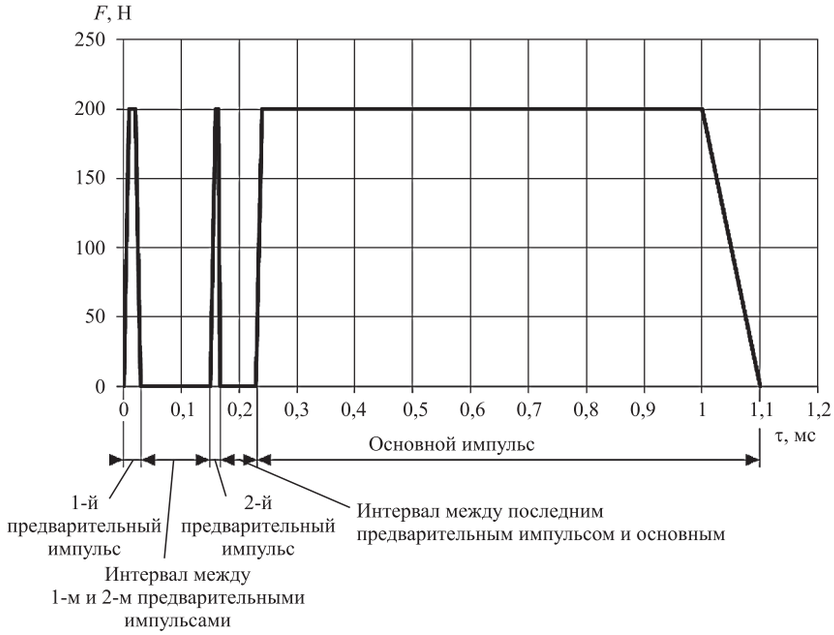


Рис. 1. Задаваемая сила *F* электромагнита сформированная двумя предварительными и одним основным управляющими импульсами

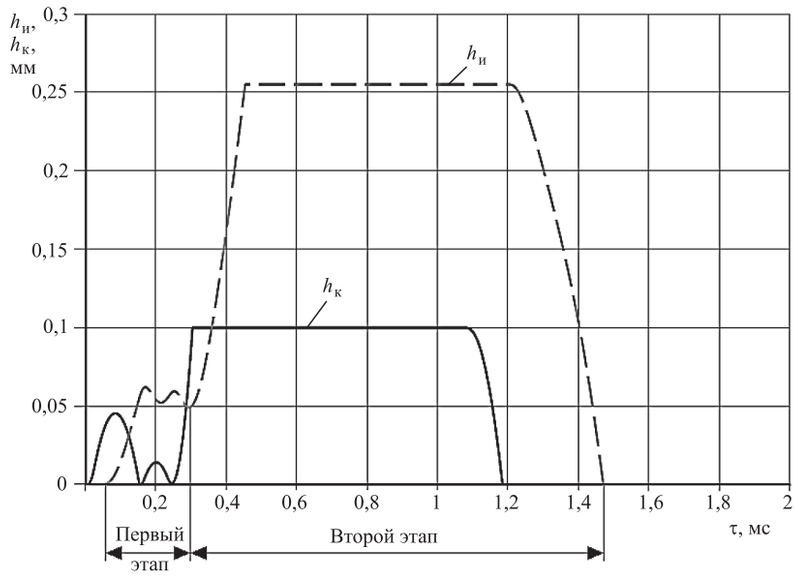


Рис. 2. Результаты расчета перемещения иглы распылителя $h_и$ и управляющего клапана $h_к$

gz118.indd 44 20.12.2017 8:26:49

Для определения $dQ/d\tau = f(\tau)$ используется специально разработанная регистрирующая камера *7* с объемом внутренней полости около 1000 мм^3. Камера заполнена дизельным топливом и в нее установлен распылитель ЭГФ *4*. В сливном отверстии камеры имеется жиклер, благодаря которому в ней создается противодавление впрыскиванию.

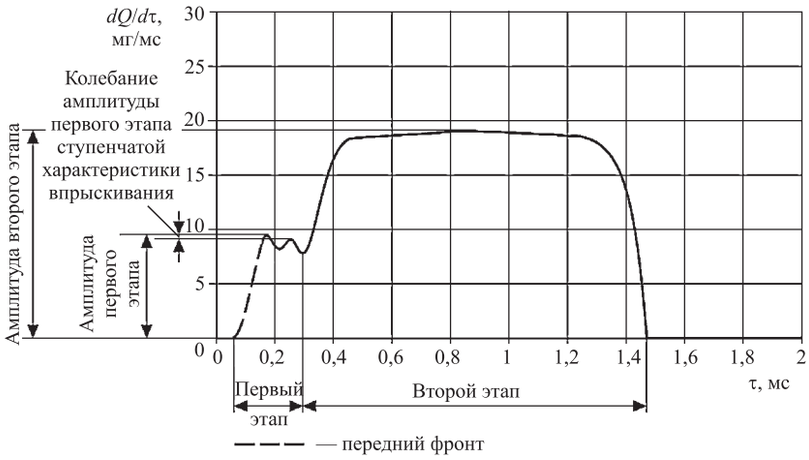
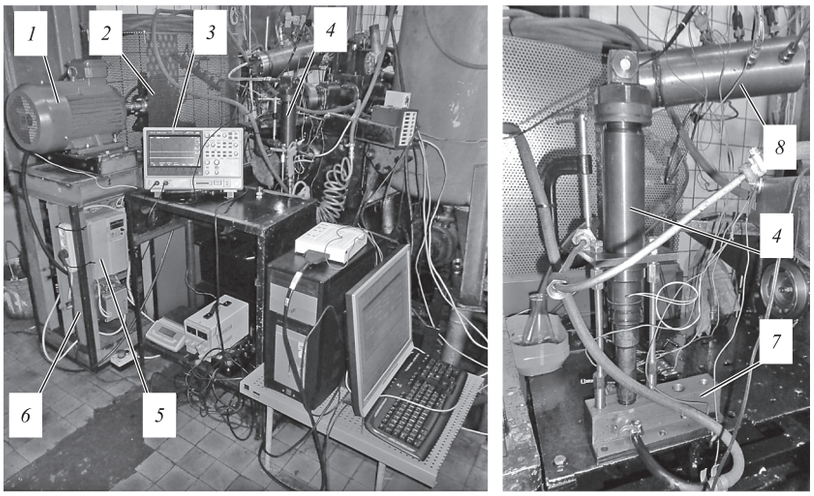


Рис. 3. Расчетная ступенчатая дифференциальная характеристика впрыскивания, сформированная двумя предварительными и одним основным управляющими импульсами



а) *б*)

Рис. 4. Безмоторный исследовательский стенд для определения дифференциальных характеристик впрыскивания электрогидравлической форсунки:

а — общий вид стенда; *б* — устройство для определения дифференциальных характеристик впрыскивания; *1* — электрический двигатель переменного тока; *2* — топливный насос высокого давления; *3* — цифровой осциллограф; *4* — электрогидравлическая форсунка; *5* — регулятор частоты вращения электродвигателя; *6* — станина; *7* — камера для регистрации дифференциальной характеристики впрыскивания; *8* — топливный аккумулятор

Сечение жиклера подобрано таким, чтобы давление в камере было равно 5...6 МПа (давление, соответствующее противодавлению впрыскиванию топлива при подаче топлива в камеру сгорания дизеля).

С противоположной стороны канала с жиклером просверлен канал под установку тензометрического датчика DMP 330L (погрешность 0,5 % диапазона измерения; диапазон измеряемых давлений 0...25 МПа), регистрирующего изменение давления в камере.

Для стабилизации давления в исследуемой ЭГФ к ней подключен внешний топливный аккумулятор *8*.

Изменение давления топлива $p_{кам}$ в камере *7* регистрируется цифровым осциллографом *3*. Затем осуществляется обработка кривой изменения давления $p_{кам}$ цифровым фильтром Савицкого-Голея [8]. Это необходимо для сглаживания электромагнитных помех и повышения устойчивости нахождения производной $dp_{кам}/d\tau$.

Далее, с применением уравнения объемного баланса (1) для полости камеры осуществляется оценка дифференциальной характеристики впрыскивания $q_{ЭГФ} = dQ/d\tau$:

$$q_{ЭГФ} = (\mu f)_{жк}\sqrt{\frac{2}{\rho_m}(p_{кам} - p_{сл})} - \alpha V_{кам}\frac{dp_{кам}}{d\tau}, \quad (1)$$

где $q_{ЭГФ}$ — расход топлива через сопловые отверстия (мл/мс), $(\mu f)_{жк}$ — эффективное проходное сечение жиклера на выходе из камеры, $p_{сл}$ — давление на выходе из камеры (Па), $V_{кам}$ — объем полости камеры (мм^3), α — сжимаемость (Па$^{-1}$).

Расчет коэффициента сжимаемости α проводится по выражению [9]:

$$a_0 = \begin{bmatrix} 1053 + 4,7(\rho_{атм} - 850) - \\ -7,82(t - 20) \end{bmatrix} \cdot 10^{-6},\ Па;$$

$$a_1 = 10,497 + 0,0141(t - 20),\ Па^{-2}; \quad (2)$$

$$a_2 = 0,9 \cdot 10^{-10},\ Па^{-3};$$

$$\alpha = \left(a_0 + a_1 p + a_2 p^2\right)^{-1},\ Па^{-1}, \quad (3)$$

где a_0, a_1, a_2 — эмпирические коэффициенты; $\rho_{атм}$ — плотность топлива

gz118.indd 45 20.12.2017 8:26:50

при 20 °С и атмосферном давлении (задается, кг/м^3); t — температура топлива (°С); p — давление, при котором производится расчет сжимаемости (Па).

Давление на выходе из камеры поддерживается постоянным с помощью обратного клапана. Характеристика клапана обладает гистерезисом, поскольку давление открытия затвора клапана немного больше давления закрытия, что необходимо учитывать при работе с выражением (1).

Экспериментальная проверка способа управления формой дифференциальной характеристики впрыскивания воздействием на импульсы тока

Для подтверждения работоспособности предложенного способа управления формой дифференциальной характеристики впрыскивания ЭГФ (8 распыливающих отверстий диаметром 0,32 мм) были назначены режимы работы, представленные в табл. 1. Во время испытаний на всех режимах давление в топливном аккумуляторе 8 (рис. 4) поддерживалось 100 МПа.

В табл. 1 и далее введены следующие обозначения:

$\Delta\tau_{имп\ 1\text{-}2}$ — интервал между первым и вторым управляющими электрическими импульсами;

$\Delta\tau_{имп\ 2\text{-}3}$ — интервал между вторым и третьим импульсами;

$\tau_{имп\ 1}$, $\tau_{имп\ 2}$, $\tau_{имп\ 3}$ — продолжительности соответственно первого, второго и третьего управляющих электрических импульсов.

Режимы 1 и 2 соответствуют подачи на электромагнит управляющего клапана ЭГФ предварительного (длительностью $\tau_{имп\ 1}$) и основного (длительностью $\tau_{имп\ 2}$) электрических импульсов.

На режиме 3 к управляющему клапану ЭГФ поступают предварительный ($\tau_{имп\ 1}$), основной ($\tau_{имп\ 2}$) и следующий за ним дополнительный ($\tau_{имп\ 3}$) электрические импульсы.

Режимы 4...7 соответствуют подачи двух предварительных ($\tau_{имп\ 1}$, $\tau_{имп\ 2}$) и основного ($\tau_{имп\ 3}$) импульсов.

Полученные интегральные $Q = f(\tau)$ и дифференциальные $dQ/d\tau = f(\tau)$ характеристики впрыскивания показаны на рис. 5. Характеристика $Q = f(\tau)$ определяет массу топлива, поступившего из распылителя ЭГФ с начала впрыскивания до текущего момента времени τ.

В табл. 2 приведены значения цикловой подачи $Q_ц$ и количества топлива, поданного за каждое из впрыскиваний при многоразовом впрыскивании, где Q_1 — количество топлива, поданное за первое впрыскивание при многоразовом впрыскивании; Q_2 — количество топлива, поданное за второе впрыскивание; Q_3 — количество топлива, поданное за третье впрыскивание.

Из сопоставления значений Q_1 с $Q_ц$ показано, что для режимов 1...4 величина предварительно впрыскиваемой порции топлива не превышает 20...25 %.

Представленные результаты характеризуют возможности способа как по обеспечению многоразового впрыскивания (рис. 5, *а—г*), так и по управлению формой дифференциальной характеристики (рис. 5, *д—ж*).

На рис. 5, *б* показана характеристика $dQ/d\tau = f(\tau)$, у которой основное впрыскивание следует за предварительным без интервала между ними.

Характеристики $dQ/d\tau = f(\tau)$ на рис. 5, *д—ж* получены подбором интервалов между управляющими импульсами тока при трехразовом впрыскивании.

Как было установлено в ходе расчетных исследований, длительность первого импульса определяет начальный подъем иглы распылителя ЭГФ. Аналогичный результат получен экспериментально. Так, на режиме 5 (рис. 5, *д*) длительность предварительного сигнала составила 0,45 мс. При этом величина первого пика дифференциальной характеристики впрыскивания составляет 62,6 мг/мс против 44 мг/мс на режимах 6, 7 (рис. 5, *е*, *ж*), где $\tau_{имп\ 1}$ = 0,34 мс.

Уменьшение $\Delta\tau_{имп\ 1\text{-}2}$ с 0,28 мс (режим 5) до 0,15 мс (режим 7) способствовало сокращению величины спада характеристики $dQ/d\tau = f(\tau)$ после первого пика вплоть до его полного исчезновения (рис. 5, *ж*).

Таблица 1

Режимы работы исследуемой электрогидравлической форсунки

№ режима	$\tau_{имп\ 1}$, мс	$\Delta\tau_{имп\ 1—2}$, мс	$\tau_{имп\ 2}$, мс	$\Delta\tau_{имп\ 2—3}$, мс	$\tau_{имп\ 3}$, мс
1	0,45	1,1	0,8	—	—
2	0,45	0,4	0,8	—	—
3	0,45	1,1	0,8	2,4	0,5
4	0,45	0,6	0,5	0,8	0,8
5	0,45	0,28	0,41	0,55	0,8
6	0,34	0,2	0,34	0,32	0,5
7	0,34	0,15	0,41	0,26	0,5

gz118.indd 46 20.12.2017 8:26:50

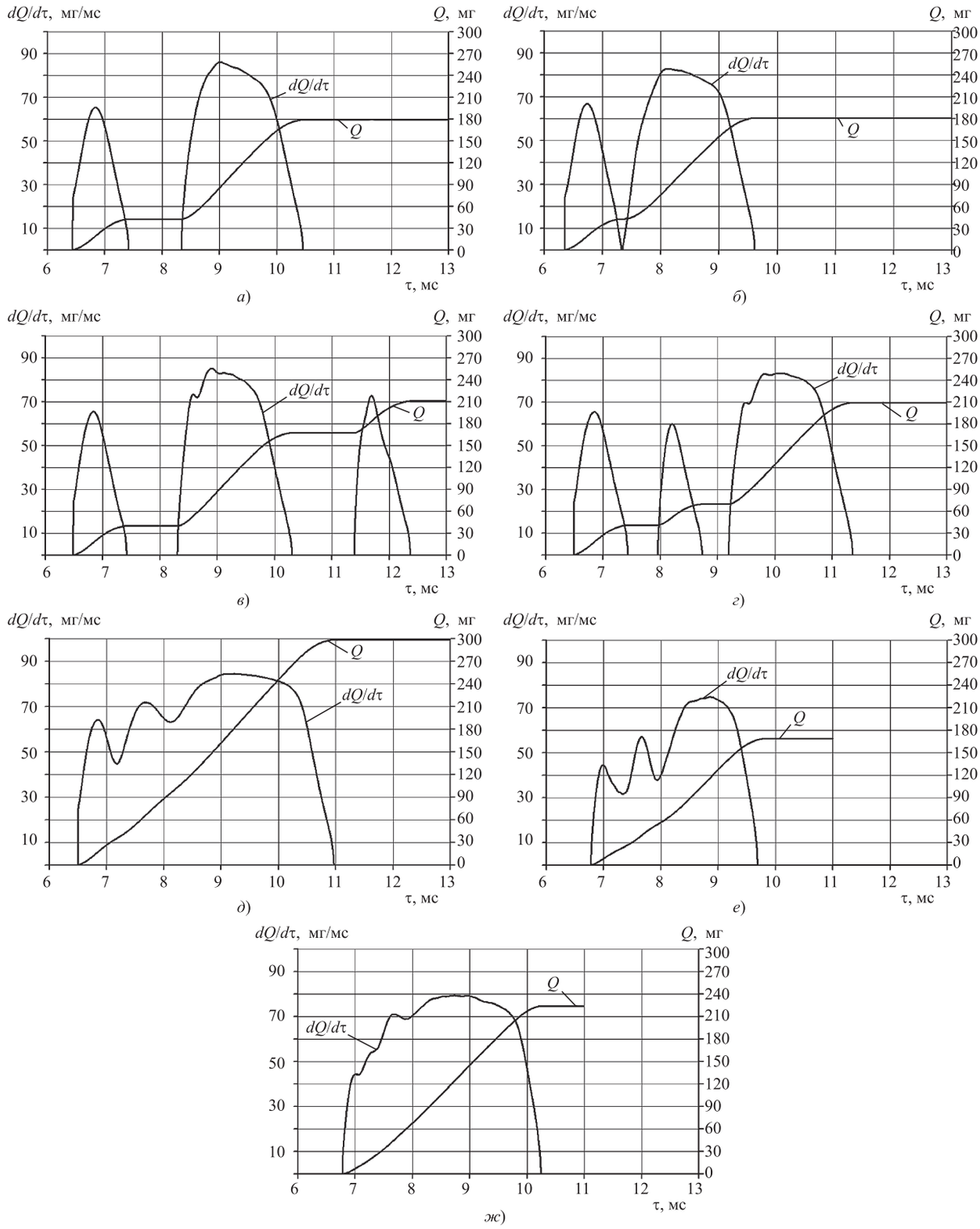


Рис. 5. Дифференциальная *dQ/dτ* и интегральная *Q* характеристики впрыскивания электрогидравлической форсунки:

τ — время; *а* — режим 1; *б* — режим 2; *в* — режим 3; *г* — режим 4; *д* — режим 5; *е* — режим 6; *ж* — режим 7

gz118.indd 47 20.12.2017 8:26:50

Таблица 2

Цикловые подачи и количество топлива, поданного исследуемой электрогидравлической форсункой за каждое впрыскивание при многоразовом впрыскивании

№ режима	Q_1, мг	Q_2, мг	Q_3, мг	$Q_ц$, мг
1	42,7	136,6	—	179,3
2	42,7	138,3	—	181,0
3	40,1	127,4	43,6	211,1
4	41,1	28,9	139,4	209,4
5*	—	—	—	298,7
6*	—	—	—	169,1
7*	—	—	—	224,0

* Впрыскивание считается однократным

Аналогичное влияние на форму характеристики $dQ/d\tau = f(\tau)$ оказывают $\tau_{имп\ 2}$ и $\Delta\tau_{имп\ 2\text{-}3}$.

Из сопоставления формы характеристики впрыскивания (рис. 5, *д—ж*) и значений $Q_ц$ (табл. 2) видно, что управление передним фронтом $dQ/d\tau = f(\tau)$ должно учитывать требуемую цикловую подачу топлива. Очевидно, что при недостаточном быстродействии привода ЭГФ и низкой точности управления будет сложно получить желаемую форму $dQ/d\tau = f(\tau)$ при заданном значении $Q_ц$. Кроме того, на последующее впрыскивание могут оказывать влияние волновые явления в ЭГФ, образованные от предварительной подачи топлива [10].

Выводы

1. Предложен способ управления формой дифференциальной характеристики впрыскивания электрическим импульсом, который подается на электромагнит управляющего клапана электрогидравлической форсунки аккумуляторной топливной системы.

2. Подбором длительностей управляющих электрических импульсов и интервалов между ними можно получить заданную форму дифференциальной характеристики впрыскивания от ступенчатой до характеристики с наклонным передним фронтом.

3. Изменение формы дифференциальной характеристики впрыскивания управляющими электрическими импульсами требует согласования с заданной величиной цикловой подачи топлива.

4. Применение способа управления формой дифференциальной характеристики впрыскивания воздействием на электрические импульсы ограничено динамикой иглы форсунки, быстродействием управляющего клапана и волновыми явлениями в форсунке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Pflaum S., Wloka J., Wachtmeister G.** Emission reduction potential of 3000 bar Common Rail Injection and development trends // CIMAC Paper No. 195, CIMAC Congress Bergen, 2010, 12 p.
2. **Shatrov M. G., Golubkov L. N., Dunin A. U., Yakovenko A. L., Dushkin P. V.** Influence of high injection pressure on fuel injection perfomances and diesel engine working process // Thermal science. — 2015. — Vol. 19, No. 6. — P. 2245—2253.
3. **Shatrov M. G., Golubkov L. N., Dunin A. U., Yakovenko A. L., Dushkin P. V.** Research of the injection pressure 2000 bar and more on diesel engine parameters // International Journal of Applied Research. — 2015. — Vol. 10, No. 20. — P. 41098—41102.
4. **Leonhard R., Parche M., Alvarez-Avila C.** [et al.]. Pressure-amplified common rail system for commercial vehicles // MTZ worldwide. — 2009. — Vol. 70, No. 5. — P. 10—15.
5. **Future Emission Demands** for Ship and Locomotive Engines — Challenges, Concepts and Synergies from HD-Applications / A. Wiartalla, L. Ruhkamp, T. Koerfer // Paper No. 174, CIMAC Congress 2010, Bergen, 10 p.
6. **Пинский Ф. И., Давтян Р. И., Черняк Б. Я.** Микропроцессорные системы управления автомобильными двигателями внутреннего сгорания. — М.: "Легион-Автодата", 2001. — 136 с.
7. **Денисов А. В.** Выбор и обоснование параметров электрогидравлической форсунки для аккумуляторной топливной системы высокооборотного дизеля: Автореферат дис. ... канд. техн. наук, НТУ "ХПИ". — Харьков, 2009. — 20 с.
8. **Savitzky A. and Golay M. J. E.** Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least-Squares Procedures // Analytical Chemistry. — 1964.— No. 36. P. 1627—1639.
9. **Грехов Л. В., Иващенко Н. А., Марков В. А.** Топливная аппаратура и системы управления дизелей: Учебник для вузов. — М.: Легион-Автодата, 2004. — 344 с.
10. **Experimental Research of Hydrodynamic** Effects in Common Rail Fuel System in Case of Multiple Injection / M. G. Shatrov, L. N. Golubkov, A. U. Dunin, A. L. Yakovenko, P. V. Dushkin // International Journal of Applied Engineering Research. — 2016. — Vol. 11, No. 10. — P. 6949—6953.

Художественный редактор *Д. С. Рыбакова*. Технический редактор *Е. М. Патрушева*. Корректор *Е. В. Комиссарова*
Сдано в набор 02.11.2017. Подписано в печать 11.12.2017. Формат 60 × 88 1/8. Усл. печ. л. 5,88.
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Оригинал-макет: ООО "Адвансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: **www.aov.ru**

gz118.indd 48 20.12.2017 8:26:51