

НАУКА и ТЕХНИКА

**Международный
научно-технический журнал**

Серия 1. Машиностроение

Издается с января 2002 года

Периодичность издания – один раз в два месяца

Учредитель

Белорусский национальный
технический университет



Science and Technique V. 17, No 5 (2018)

**International
Scientific and Technical Journal**

Series 1. Mechanical Engineering

Published from January 2002

Publication frequency – bimonthly

Founder

Belarusian National
Technical University

Журнал включен в базы данных:

Web of Science Core Collection (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat,
OpenAIRE, Google Scholar, РИНЦ, ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет

The Journal is included in the following databases:

Web of Science Core Collection (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat,
OpenAIRE, Google Scholar, RISC, Lan, CyberLeninka, Socionet

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение

- Шелег В. К., Латыпова Е. Ю., Цумарев Ю. А.,
Цумарев Е. Н.**
Системный подход к изготовлению
неразъемных соединений 359
- Босяков М. Н., Козлов А. А.**
Газодинамические характеристики
тлеющего разряда при ионном азотировании ... 368
- Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И.,
Оковитый В. В., Асташинский В. М., Углов В. В.,
Шиманский В. И., Черенда Н. Н.**
Формирование и исследование плазменных
порошковых покрытий из оксидной керамики,
модифицированной высокоэнергетическими
воздействиями 378
- Козерук А. С., Мальпика Д. Л., Сухоцкий А. А.,
Филонова М. И., Кузнецик В. О.**
Исследование влияния наладочных параметров
станка на производительность
и качество процесса одновременной
двусторонней обработки линз 390

CONTENTS

Mechanical Engineering

- Sheleg V. K., Latypova E. Yu., Tsumarev Yu. A.,
Tsumarev E. N.**
Systematic Approach to Producing
Non-Detachable Connections 359
- Bosyakov M. N., Kozlov A. A.**
Gas-Dynamic Specifications
of Glow Discharge During Ion Nitriding Process ... 368
- Okovity V. A., Panteleenko F. I.,
Okovity V. V., Astashinsky V. M., Uglov V. V.,
Chimanskiy V. I., Cerenda N. N.**
Formation and Investigation
of Plasma Powder Coatings Made
of Oxide Ceramics Modified
with High-Energy Effects 378
- Kozeruk A. S., Malpica Y. L., Sukhotzkiy A. A.,
Filonova M. I., Kuznechik V. O.**
Investigation of Machine Tool Developed Settings
Influence on Productivity
and Quality of Simultaneous
Double-Sided Lens Processing 390

Капский Д. В., Навой Д. В., Пегин П. А. Управление в интеллектуальной транспортной системе г. Минска	401
Loveikin V. S., Romasevich Y. A. Optimization of Bridge Crane Movement Control (Ловеикин В. С., Ромасевич Ю. А. Оптимизация управления движением мостового крана)	413
Нгиа Ле Ван Обратная связь в цепи управления автоматизированным сцеплением при трогании грузового автомобиля с места	421
Сушкевич П. П. Трансформация мировой автомобильной Промышленности	432
Zalohin M. Yu., Liubarskyi B. A., Schuklinov S. N., Mychalevych M. G., Leontiev D. N. Study of Proportional Pressure Modulator on the Basis of Electromagnetic-Type Linear Motor (Залогин М. Ю., Любарский Б. А., Шуклинов С. Н., Михалевич Н. Г., Леонтьев Д. Н. Исследование пропорционального модулятора давления на основе линейного двигателя электромагнитного типа)	440

Kapskiy D. V., Navoy D. V., Pegin P. A. Control of Intelligent Transport System in Minsk	401
Loveikin V. S., Romasevich Y. A. Optimization of Bridge Crane Movement Control	413
Nghia Le Van Feedback in Automated Clutch Control Circuit for Truck Start-Up Process	421
Sushkevich P. P. Transformation of World Automotive Industry	432
Zalohin M. Yu., Liubarskyi B. A., Schuklinov S. N., Mychalevych M. G., Leontiev D. N. Study of Proportional Pressure Modulator on the Basis of Electromagnetic-Type Linear Motor	440

Главный редактор
Борис Михайлович Хрусталеv

Редакционная коллегия

- В. В. БАБИЦКИЙ (Белорусский национальный
технический университет, Минск, Республика
Беларусь),*
*В. Г. БАШТОВОЙ (Белорусский национальный тех-
нический университет, Минск, Республика Бе-
ларусь),*
*А. В. БЕЛЫЙ (Физико-технический институт На-
циональной академии наук Беларуси, Минск,
Республика Беларусь),*
*В. П. БОЙКОВ (Белорусский национальный техни-
ческий университет, Минск, Республика Бела-
русь),*
*С. В. БОСАКОВ (Республиканское унитарное
предприятие по строительству «Институт
БелНИИС», Минск, Республика Беларусь),*
*Ю. В. ВАСИЛЕВИЧ (Белорусский национальный
технический университет, Минск, Республика
Беларусь),*
*О. Г. ДЕВОЙНО (Белорусский национальный тех-
нический университет, Минск, Республика Бе-
ларусь),*
*К. В. ДОБРЕГО (Белорусский национальный тех-
нический университет, Минск, Республика Бе-
ларусь),*

Editor-in-Chief
Boris M. Khroustalev

Editorial Board

- V. V. BABITSKY (Belarusian National Technical Uni-
versity, Minsk, Republic of Belarus),*
*V. G. BASHTOVOI (Belarusian National Technical
University, Minsk, Republic of Belarus),*
*A. V. BYELI (Physical-Technical Institute of National
Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic
of Belarus),*
*V. P. BOYKOV (Belarusian National Technical Univer-
sity, Minsk, Republic of Belarus),*
*S. V. BOSAKOV (Republican Unitary Scientific-
Research Enterprise for Construction "Institute
BelNIIS", Minsk, Republic of Belarus),*
*Yu. V. VASILEVICH (Belarusian National Technical
University, Minsk, Republic of Belarus),*
*O. G. DEVOINO (Belarusian National Technical Uni-
versity, Minsk, Republic of Belarus),*
*K. V. DOBREGO (Belarusian National Technical Uni-
versity, Minsk, Republic of Belarus),*

П. И. ДЯЧЕК (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 М. З. ЗГУРОВСКИЙ (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина),
 Р. Б. ИВУТЬ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 А. С. КАЛИНИЧЕНКО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),
 М. Г. КИСЕЛЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 Я. Н. КОВАЛЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 В. В. КОЗЛОВСКИЙ (Минский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова», Минск, Республика Беларусь),
 В. М. КОНСТАНТИНОВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 Н. В. КУЛЕШОВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 С. Н. ЛЕОНОВИЧ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 С. А. МАСКЕВИЧ (Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь),
 Э. И. МИХНЕВИЧ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 НГУЕН ТХУ НГА (Научный энергетический институт Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),
 М. ОПЕЛЯК (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),
 О. Г. ПЕНЯЗЬКОВ (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
 Г. А. ПОТАЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),

P. I. DYACHEK (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 M. Z. ZGUROVSKY (National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine),
 R. B. IVUT (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 A. S. KALINICHENKO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),
 M. G. KISELEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 Ya. N. KOVALEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 V. V. KOZLOVSKIY (Minsk Branch of Plekhanov Russian University of Economics, Minsk, Republic of Belarus),
 V. M. KONSTANTINOV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 N. V. KULESHOV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 S. N. LEONOVICH (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 S. A. MASKEVICH (International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus),
 E. I. MIHNEVICH (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 NGUYEN THU NGA (Institute of Energy Science of the Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Republic of Vietnam),
 M. OPELYAK (Lublin University of Technology "Politechnika Lubelska", Lublin, Republic of Poland),
 O. G. PENYAZKOV (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
 G. A. POTAEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),

О. П. РЕУТ (Филиал БНТУ «Институт повышения квалификации и переподготовки кадров по новым направлениям развития техники, технологии и экономики», Минск, Республика Беларусь),
Ф. А. РОМАНИУК (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
И. И. СЕРГЕЙ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
В. Л. СОЛОМАХО (Республиканский институт инновационных технологий Белорусского национального технического университета, Минск, Республика Беларусь),
С. А. ЧИЖИК (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
А. Н. ЧИЧКО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
В. К. ШЕЛЕГ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Й. ЭБЕРХАРДШТАЙНЕР (Венский технический университет, Вена, Австрия),
Б. А. ЯКИМОВИЧ (Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Российская Федерация)

O. P. REUT (Branch of the BNTU "Institute of Advanced Training and Retraining for New Areas of Engineering, Technology and Economy", Minsk, Republic of Belarus),
F. A. ROMANIUK (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
I. I. SERGEY (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
V. L. SOLOMAKHO (Republic Institute of Innovative Technologies of the Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
S. A. CHIZHIK (The National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
A. N. CHICHKO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
V. K. SHELEG (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
J. EBERHARDSTEINER (Vienna University of Technology, Vienna, Austria),
B. A. YAKIMOVICH (M. T. Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation)

Ответственный секретарь редакции

В. Н. Гурьянчик

Адрес редакции

Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65, корп. 2, комн. 327
220013, г. Минск, Республика Беларусь

Тел. +375 17 292-65-14

E-mail: sat@bntu.by
<http://sat.bntu.by>

Executive Secretary of Editorial Staff

V. N. Guryanchyk

Address

Belarusian National Technical University
Nezavisimosty Avenue, 65, Building 2, Room 327
220013, Minsk, Republic of Belarus

Tel. +375 17 292-65-14

E-mail: sat@bntu.by
<http://sat.bntu.by>

Перерегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 19 декабря 2011 г.
Регистрационный номер 285

С 2002 г. издание выходило под названием «Вестник БНТУ»

ISSN 2227-1031. Подписные индексы 00662, 006622

Подписано в печать 04.10.2018. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 11,75. Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз. Дата выхода в свет . Заказ № .

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

© Белорусский национальный технический университет, 2018

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-359-367>

УДК 621.791

Системный подход к изготовлению неразъемных соединений

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. В. К. Шелег¹⁾,
кандидаты техн. наук Е. Ю. Латыпова²⁾, Ю. А. Цумарев²⁾, магистр Е. Н. Цумарев²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾ООО «Вебер Комеханикс» (Москва, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Предложен системный подход к изготовлению неразъемных соединений, основанный на объединении технических решений в области сварки, пайки, склеивания и других технологий, который включает в себя не только непосредственное выполнение соединения, но и его конструирование, подготовительные операции, а также мероприятия после образования соединения. Подход основан на принципах необходимого разнообразия, обратной связи, иерархичности и декомпозиции, что обеспечивает высокую эффективность разрабатываемых технических решений, возможность постановки и успешного разрешения проблем в области создания неразъемных соединений. Для успешной реализации системного подхода предлагается учитывать ряд аспектов: системно-структурный, заключающийся в выяснении внутренних связей и зависимостей между элементами данной системы, что позволяет получить представление о внутренней организации (строении) исследуемой системы; системно-функциональный, предполагающий выявление функций, для выполнения которых создается система; системно-целевой, означающий необходимость научного определения целей и подцелей системы, их взаимной увязки между собой; системно-ресурсный, который заключается в тщательном выявлении ресурсов, требующихся для функционирования системы и решения системой той или иной проблемы; системно-интеграционный, состоящий в определении совокупности качественных свойств системы, обеспечивающих ее целостность и особенность; системно-коммуникационный, требующий выявления внешних связей данной системы с другими, т. е. ее связей с окружающей средой; системно-исторический, позволяющий выяснить условия возникновения исследуемой системы, пройденные ею этапы, современное состояние, а также возможные перспективы развития. На базе системного подхода разработаны новые конструкции соединений смешанного (гибридного) типа, приведены примеры и классификация таких соединений.

Ключевые слова: системный подход, неразъемные соединения, необходимое разнообразие, декомпозиция, обратная связь, гибридные соединения

Для цитирования: Системный подход к изготовлению неразъемных соединений / В. К. Шелег [и др.] // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 5. С. 359–367. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-359-367>

Systematic Approach to Producing Non-Detachable Connections

V. K. Sheleg¹⁾, E. Yu. Latypova²⁾, Yu. A. Tsumarev²⁾, E. N. Tsumarev²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾JSC “Veber Komekhaniks” (Moscow, Russian Federation)

Abstract. The paper proposes a systematic approach to producing non-detachable connections which is based on unified technical solutions in the field of welding, soldering, gluing and other technologies. The given approach includes not only direct execution of the connection but its designing, preparatory operations and also measures carried out after connection

Адрес для переписки

Шелег Валерий Константинович
Белорусский национальный технический университет
ул. Б. Хмельницкого, 9,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-74-54
metech@bntu.by

Address for correspondence

Sheleg Valery K.
Belarusian National Technical University
9 B. Hmelnitzkogo str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-74-54
metech@bntu.by

producing. The proposed approach is also based on the principles of the required diversity, feedback, hierarchy and decomposition that ensures high efficiency of the developed technical solutions, possibility for setting-up and successful solution of problems in the field of producing non-detachable connections. In order to ensure a successful realization of systematic approach it is proposed to take into account a number of aspects, including the following: systematic and structural aspect that presupposes determination of internal relations and dependences between elements of the given system and it permits to obtain an overview about internal structure (composition) of the investigated system; systematic and functional aspect that presupposes determination of functions, and the system is created for performing these functions; systematic and purposeful aspect that signifies a necessity of scientific determination of system goals and sub-goals, their harmonization between themselves; systematic and resource aspect that presupposes thorough determination of the resources which are required for system performance and solution of various problems with the help of the system; systematic and integration aspect that presupposes to determine a complex of system qualitative properties which ensure its integrity and specificity; systematic and communication aspect that requires determination of external relations of the given system with others that is its relations with the environment; systematic and historical aspect that permits to determine conditions for creation of the investigated system, its past stages, modern state and also possible prospects of development. New connection designs of combined (hybrid) type have been developed on the basis of the systematic approach and the paper presents examples and classification of such connections.

Keywords: systematic approach, non-detachable connections, required diversity, decomposition, feedback, hybrid connections

For citation: Sheleg V. K., Latypova E. Yu., Tsumarev Yu. A., Tsumarev E. N. (2018) Systematic Approach to Producing Non-Detachable Connections. *Science and Technique*. 17 (5), 359–367. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-359-367> (in Russian)

Принципы системного подхода в технике создания неразъемных соединений

Техника создания неразъемных соединений является важнейшим элементом современного производства, и ее развитие ставит перед специалистами сложные задачи технологического и конструкторского характера. Эти задачи тесно связаны с проблемами, которые возникают из-за постоянного усложнения условий эксплуатации изделий, разработки и широкого внедрения новых конструкционных материалов, расширения объемов применения защитных покрытий, а также стремления к максимальной экономичности технологического процесса. Возрастает также важность проблем экологического характера. Для их успешного решения был разработан комплексный подход [1, 2], при котором испытания неразъемных соединений рассматриваются как важная составляющая системы формирования их свойств [1].

Кроме того, предложено рассматривать получение неразъемных соединений как единый процесс взаимодействия технических решений в области сварки, пайки, склеивания и механического скрепления в совокупности с подготовительными операциями [2]. Этот перечень можно дополнить мероприятиями, осуществля-

емыми после непосредственного образования неразъемного соединения (снятие остаточных деформаций и напряжений, удаление брызг расплавленного металла, термическая обработка для устранения нежелательных структур, устранение концентраторов напряжений).

Таким образом, рекомендации [1, 2] являются предпосылками для системного подхода к технике создания неразъемных соединений, который коренным образом повышает эффективность управления в любой сфере деятельности. Системный анализ показывает, что в каждой оптимально организованной системе должны быть (а в естественных системах обязательно присутствуют) внутренние механизмы саморегулирования и саморазвития. Попытки организовать систему и управлять ею вопреки этим механизмам приводят к застою и деградации системы.

По современным представлениям, системный подход – это способ организации действий, направленных на выявление закономерностей и взаимосвязей внутри исследуемого объекта с целью более эффективного его использования [3]. При этом системный подход – не только метод решения задач, но и метод их постановки, что позволяет поднять технологии на более высокий уровень по сравнению с традиционным подходом к решению проблем [3].

Анализ опубликованных литературных данных показывает, что многие важные вопросы, связанные с разработкой системного подхода к проектированию и созданию неразъемных соединений, до сих пор даже не ставились [1]. В первую очередь следует отметить, что сами способы создания неразъемных соединений (сварка, пайка, механическое соединение либо склеивание) не рассматривались в качестве элементов анализируемой системы. Это упрощало систему, и поэтому не позволяло корректно обосновать выбор способа соединения, в максимальной степени соответствующего заданным условиям [3]. Кроме того, при таком подходе исключалась возможность взаимодействия различных способов создания соединений друг с другом, что неоправданно уменьшает возможное разнообразие при создании проблеморазрешающей системы.

Таким образом, сложившийся подход к выделению системы не соответствует закону необходимого разнообразия [4]. В соответствии с данным законом при увеличении разнообразия решаемой проблемы, обусловленном, например, усложнением условий эксплуатации или появлением новых, более эффективных конструкционных материалов, должно возрастать и разнообразие внутри проблеморазрешающей системы. В противном случае такая система не сможет отвечать задачам управления, выдвигаемым внешней средой, и будет малоэффективной. Отсутствие или недостаточность разнообразия могут привести к нарушению целостности подсистем, составляющих анализируемую систему, а эффективные в прошлом приемы утратят свою действенность [4].

Рост разнообразия, характерный для системного подхода, позволяет в наиболее полной мере реализовать и принцип выбора реше-

ния, который заключается в том, что решение должно приниматься на основе рассмотрения нескольких вариантов. Там, где решение принимается на анализе одного варианта, отсутствуют предпосылки к объективному и оптимальному решению, учитывающему все особенности любого конкретного случая [5].

Характерным примером, показывающим возможности системного подхода в постановке новых научных проблем, является анализ напряженно-деформированного состояния нахлесточных соединений, которые широко применяются в пайке, сварке, склеивании, а также при механическом скреплении деталей. В рамках простого предметного подхода к этой задаче были широко распространены расчетные схемы, которые не соответствовали принципу статического равновесия [6]. В них нахлесточное соединение находилось под действием двух сил, составляющих пару, и только при системном подходе удалось выявить противоречия между элементами системы расчета, породившие серьезную проблему, – невозможность применения прикладных компьютерных программ. После формулировки и постановки проблемы было найдено решение, основанное на системном подходе, который обязательно включает в себя системно-элементный или системно-комплексный аспект (правильное выявление элементов, составляющих данную систему) и определяет ресурс, необходимый для решения проблемы, – теорема о равновесии механической системы под действием двух сил. Все это позволило окончательно сформулировать решение поставленной проблемы: в расчетной схеме обе силы должны быть направлены по одной прямой, проходящей через точки приложения заданных сил (рис. 1) [6–10].

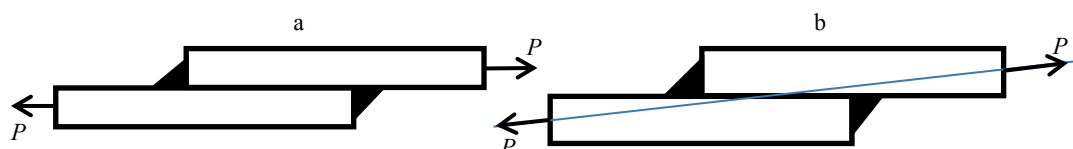


Рис. 1. Расчетные схемы для неразъемных нахлесточных соединений:

a – традиционная; b – предлагаемая, соответствующая принципу статического равновесия

Fig. 1. Calculation model for non-detachable overlap connections: a – conventional model;

b – proposed model corresponding to principle of static balance

Для успешной реализации системного подхода необходимо учитывать и другие аспекты [5]:

- системно-структурный, заключающийся в выяснении внутренних связей и зависимостей между элементами данной системы, что позволяет получить представление о внутренней организации (строении) исследуемой системы;
- системно-функциональный, предполагающий выявление функций, для выполнения которых создается система;
- системно-целевой, означающий необходимость научного определения целей и подцелей системы, их взаимной увязки между собой;
- системно-ресурсный, который заключается в тщательном выявлении ресурсов, требующихся для функционирования системы и решения системой той или иной проблемы;
- системно-интеграционный, состоящий в определении совокупности качественных свойств системы, обеспечивающих ее целостность и особенность;
- системно-коммуникационный, требующий выявления внешних связей данной системы с другими, т. е. ее связей с окружающей средой;
- системно-исторический, позволяющий выяснить условия возникновения исследуемой системы, пройденные ею этапы, современное состояние, а также возможные перспективы развития.

Рассматривая проблемные вопросы создания неразъемных соединений с системно-исторической точки зрения, необходимо опираться на основные законы диалектики и, совершен-

ствуя систему, проявлять готовность к своевременному отбрасыванию устаревших и неэффективных ее элементов. Например, в [11] показано, что стандартные испытания паяных соединений на циклическую нагрузку не обеспечивают достоверности получаемых результатов, и предложена методика, основанная на изгибе вращающегося образца. Для реализации этой методики были разработаны конструкции образцов, что позволило не только обеспечить высокую достоверность, но упростило и удешевило исследования, а также дало возможность в полной мере учесть конструктивные особенности исследуемых соединений и технологию их пайки [12] и влияние термических напряжений на результаты испытаний [13].

Другой характерный пример – диалектическое отрицание несимметричного таврового паяного соединения, при конструировании которого была предпринята не вполне корректная попытка снизить концентрацию напряжений и их максимальное значение путем увеличения площади спая. Анализ распределения напряжений, обусловленных действием продольной нагрузки, показал, что многократное увеличение площади спая, характерное для известной схемы, не привело к прогнозируемому снижению величины максимальных напряжений в опасных зонах паяного таврового соединения. Более эффективным оказалось новое техническое решение [14], основанное на использовании симметричной составной заготовки [15] с такой же площадью спая, как у известного соединения, лишенного симметрии (рис. 2).

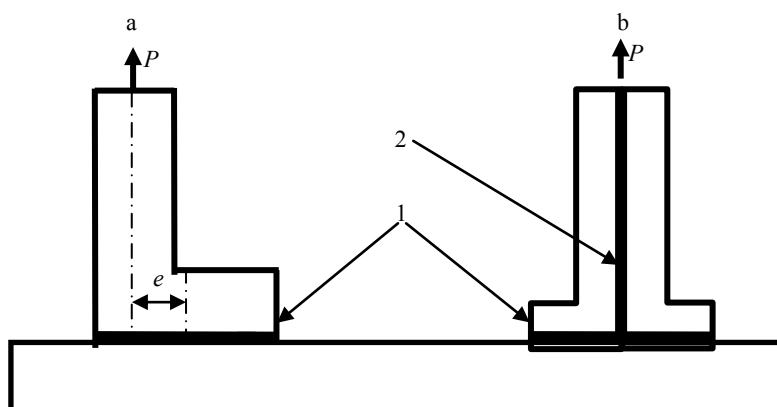


Рис. 2. Схемы тавровых паяных соединений с увеличенной площадью спая: а – известного асимметричного; б – составного симметричного, разработанного на базе системного подхода

Fig. 2. Schemes of tee joints with increased soldered seam area: а – known asymmetric soldered seam; б – combined symmetric soldered seam developed on the basis of systematic approach

Диалектическое отрицание устаревших технических решений не может заканчиваться формулировкой достоверной и корректной научной рекомендации. Оно должно быть формализовано путем внесения соответствующих изменений и дополнений в нормативную документацию, прежде всего, в действующие стандарты [16–18].

Одним из важнейших принципов системного подхода является иерархичность строения, которая заключается в том, что внутри системы можно выделить элементы или подсистемы, связанные друг с другом по принципу подчинения элементов низшего уровня элементам более высокого уровня. Этот принцип позволяет реализовать многоуровневое управление процессом образования неразъемных соединений, характерное для всех организованных систем. Однако он до настоящего времени не нашел широкого применения в технике неразъемных соединений. Особенно важным является правильное определение соотношения между частями системы, которые относятся к технологической сфере, с одной стороны, и совокупностью элементов, определяющих эффективность конструирования, с другой. Здесь важно мнение авторов [19], которые считают, что конструктивные подходы позволяют получать более высокие результаты по несущей способности, надежности и долговечности, а также по способности сопротивляться хрупким разрушениям, чем технологические приемы. Соответственно часть системы, связанная с конструированием и расчетом соединений, должна относиться к более высокому иерархическому уровню в сравнении технологической подсистемой. К сожалению, в настоящее время в технике создания соединений приоритетным является именно технологическое направление. Это особенно характерно для пайки, где практически полностью отсутствуют новые подхо-

ды к конструированию, оценке несущей способности и проведению испытаний соединений. Причина такого состояния – известная из теории управления особенность нижних уровней, которая заключается в том, что они обладают более высокой скоростью реакции и быстротой переработки поступающих сигналов.

Стремление к учету всех факторов, связанных с конструированием и изготовлением неразъемных соединений, приводит к усложнению системы. Поэтому системный подход невозможно реализовать без применения принципа декомпозиции, который позволяет рассматривать анализируемую систему как совокупность независимых друг от друга элементов (подсистем). Тем самым управление сложной системой сводится к отбору взаимосвязанных факторов и расчленению решаемой задачи на ряд более простых последовательных звеньев. Эффективность данного принципа можно показать на примере, описанном в [20], где на основе декомпозиции напряженного состояния [21] разработана рекомендация по специальной подготовке кромок к контактной точечной сварке. Скос кромок соединяемых деталей (рис. 3) позволил осуществить сварку заготовок толщиной $8 + 8$ мм по режиму, характерному для толщин $5 + 5$ мм, и за счет четырехкратного уменьшения эксцентриситета приложенных сил повысить прочность соединения в 1,28 раза. При этом более благоприятное распределение рабочих напряжений в предлагаемом соединении создает предпосылки к расширению диапазона толщин для применения клеесварного варианта технологии получения неразъемного соединения. Сравнение традиционного и предлагаемого вариантов соединения показывает, что предлагаемое соединение при толщинах $8 + 8$ мм обеспечивает эксцентриситет приложенных сил в 2,5 раза меньший, чем в традиционном соединении $5 + 5$ мм.

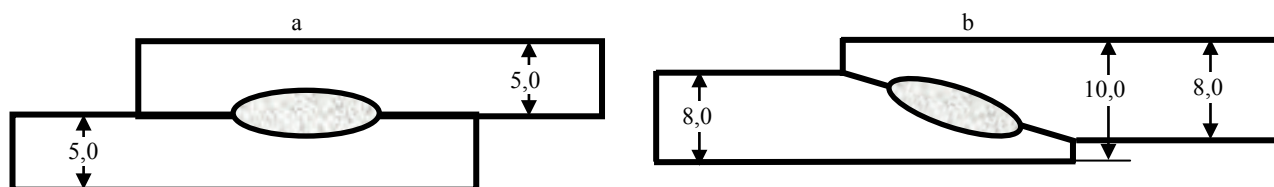


Рис. 3. Схемы точечных сварных соединений:

а – традиционного; б – разработанного на основе декомпозиции напряженного состояния

Fig. 3. Schemes of spot-welded joints: а – conventional spot-welded joint;

б – spot-welded joint developed on the basis of decomposition of stress state

При разработке системного подхода необходимо учитывать, что любая система успешно функционирует и развивается по пути прогресса только тогда, когда в ней имеется обратная связь, для чего в проекте организации системы специально закладываются соответствующие возможности и условия [3–5]. В противном случае неизбежны застой системы, холостое ее функционирование. Из-за отсутствия системного подхода в производстве неразъемных соединений принцип обратной связи, без которого невозможно управление системой на научных принципах, до настоящего времени не нашел должного применения. Основная роль обратной связи состоит в том, что, сообщая органу управления информацию о реальном состоянии объекта и сигнализируя о достигнутом результате, она позволяет осуществлять регулирование в условиях неполной информации о возмущающих воздействиях. Наличие обратной связи придает системе способность к саморегулированию и адаптации [3]. Воздействие входного сигнала на объект, переработка его в выходной сигнал и обратное действие выхода через канал обратной связи на входную величину – все это процессы передачи и переработки информации. Поэтому в системном подходе важную роль должны играть принципы компьютерного моделирования, позволяющие получать необходимую информацию о свойствах создаваемого объекта, например, о его напряженно-деформированном состоянии. Системный подход дает возможность более широко использовать принцип обратной связи за счет включения в систему контрольно-измерительных операций и необходимых испытаний. При этом системное конструирование позволяет реализовывать схемы не только отрицательной и положительной, но и упреждающей обратной связи [3].

Неразъемные соединения гибридного типа и их классификация

Рассматривая возможное взаимодействие конструктивных форм, характерных для различных способов создания неразъемных соединений, выделим те, которые имеют наиболее широкое применение: сварка плавлением (С),

контактная точечная сварка (Т), пайка (П), склеивание (К) и механическое соединение (М). В результате взаимодействия конструктивных форм образуются новые разновидности неразъемных соединений смешанного (гибридного) типа, обладающие рядом преимуществ по сравнению с традиционными видами. Схематично образование таких соединений приведено на рис. 4, где показано, что каждое из гибридных соединений относится к какому-либо типу, известному из традиционной техники конструирования, т. е. является в целом стыковым, нахлесточным или тавровым. Примеры возможной конкретной реализации принципа взаимодействия конструктивных форм, создаваемых на базе различных технологических процессов, представлены на рис. 5.

Применение пайки для снижения концентрации напряжений, предложенное в [22], приводит к гибриднему сварно-паяному соединению стыкового типа (рис. 5а), которое можно обозначить следующим образом: (С) С–П (стыковое, сварно-паяное). Паяное нахлесточное соединение с упрочняющими стержнями (рис. 5б) [1] можно обозначить как (Н) П–М (нахлесточное, паяно-механическое).

При расширении номенклатуры гибридных соединений предложенная система обозначения может несколько усложниться, например, путем создания гибридных соединений на базе трех технологических процессов. В частности, авторам представляется возможной разработка соединения нахлесточного типа с использованием сварки плавлением, точечной сварки и склеивания. То есть для традиционного клеесварного соединения может оказаться эффективной дополнительная обварка, которая делает систему швов более распределенной с меньшей концентрацией напряжений. При создании гибридного соединения возможна комбинация однородных технологических процессов. Так, соединение, показанное на рис. 2, можно рассматривать как гибридное, если связующий паяный шов 2 в нем выполнить низкотемпературной пайкой, а рабочий шов 1, требующий большей прочности, – высокотемпературной. В этом случае тавровое соединение (рис. 2) приобретает все признаки гибридного паяно-паяного соединения.

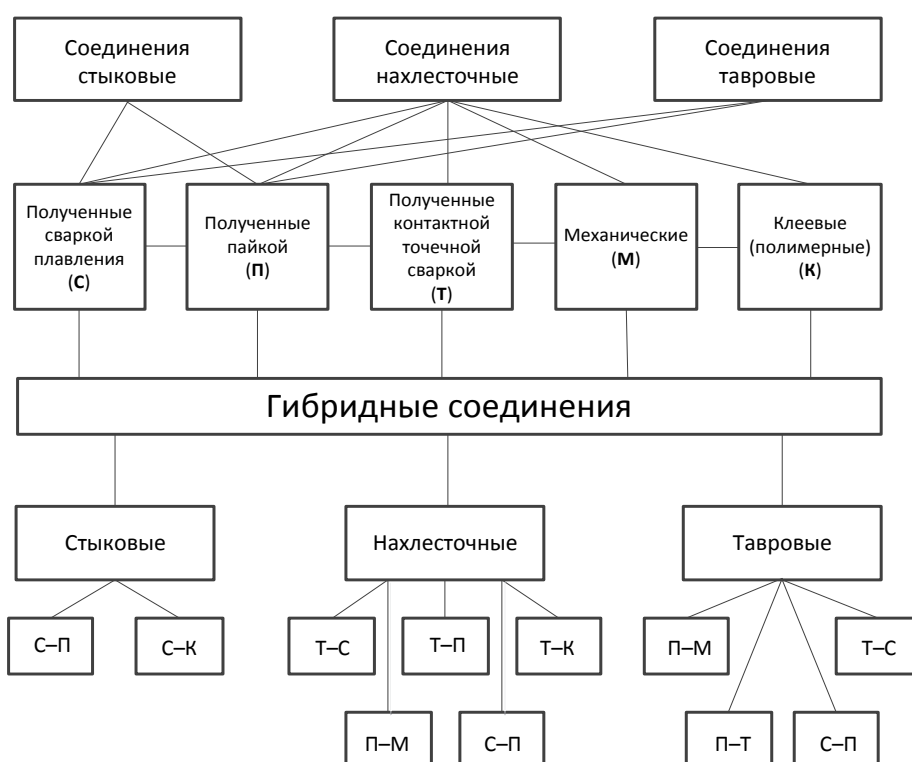


Рис. 4. Схема взаимодействия конструктивных форм и образования соединений гибридного типа

Fig. 4. Scheme of design shapes interaction and formation of hybrid-type connections

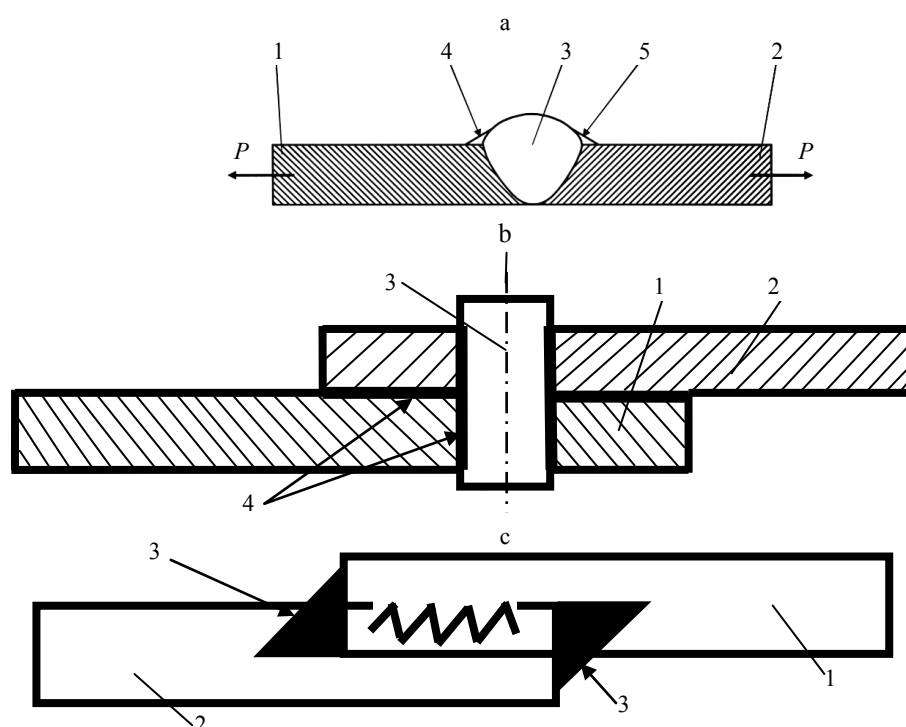


Рис. 5. Схемы гибридных соединений: а – стыковое паяно-сварное: 1, 2 – соединяемые детали; 3 – сварной шов; 4, 5 – напайки; б – нахлесточное паяно-механическое: 1, 2 – соединяемые детали; 3 – упрочняющий стержень; 4 – паяный шов; в – нахлесточное механико-сварное: 1, 2 – соединяемые детали; 3 – сварной шов

Fig. 5. Schemes of hybrid connections: а – butt welded-soldered joints: 1, 2 – parts to be connected; 3 – welded joint; 4, 5 – soldering; б – overlap soldered-mechanical connection: 1, 2 – parts to be connected; 3 – hardening rod; 4 – soldered joint; в – overlap welded-mechanical: 1, 2 – parts to be connected; 3 – welded joint

Представляется возможной комбинация двух сварочных процессов при выполнении одного соединения. Так, в ГОСТ 14771–76 представлено тавровое соединение Т7, которое содержит основной и подварочный сварные швы. Согласно рекомендациям данного стандарта, основной и подварочный швы необходимо выполнять сваркой в защитном газе, что не всегда возможно из-за отсутствия хорошего доступа к обратной стороне шва. Поэтому отсутствие системного подхода в этом случае заставило бы конструктора использовать одностороннее соединение Т6, обладающее более низкой работоспособностью из-за ярко выраженной асимметрии, которая, согласно выводам [23–25], является причиной возникновения дополнительных напряжений от изгиба. Системный подход и представление о гибридных неразъемных соединениях приводят к эффективному решению данной проблемы: основной шов выполняется механизированной сваркой в защитном газе, обеспечивающей высокую производительность труда, а подварочный шов – лежачим электродом, который не требует значительного пространства при сварке.

ВЫВОДЫ

1. Предложен системный подход к технике создания неразъемных соединений, основанный на законе необходимого разнообразия и разработке гибридных соединений, сочетающих в себе конструктивные и технологические особенности, присущие различным технологическим процессам.

2. Разработана классификация соединений гибридного типа, учитывающая их конструктивные особенности и технологию изготовления, а также конкретные конструкции гибридных соединений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цумарев, Ю. А. Критериальный подход к созданию конструктивных форм паяных соединений / Ю. А. Цумарев // Сварочное производство. 2010. № 3. С. 34–38.
2. Цумарев, Ю. А. Получение комбинированных неразъемных соединений / Ю. А. Цумарев // Сварочное производство. 2011. № 4. С. 42–46.
3. О'Коннор, Дж. Искусство системного мышления / Дж. О'Коннор, И. Макдермотт. М.: Альпина Бизнес Букс, 2006. 256 с.

4. Эшби, У. Р. Введение в кибернетику / У. Р. Эшби. М.: Изд-во иностр. лит., 1959. 433 с.
5. Волкова, В. Н. Теория систем / В. Н. Волкова, А. А. Денисов. М.: Высш. шк., 2006. 511 с.
6. Цумарев, Ю. А. Расчет напряженно-деформированного состояния нахлесточных соединений / Ю. А. Цумарев // Сварка и диагностика. 2011. № 2. С. 14–18.
7. Шелег, В. К. Влияние геометрических размеров паяного нахлесточного соединения на его напряженно-деформированное состояние / В. К. Шелег, Ю. А. Цумарев, Е. В. Игнатова // Наука и техника. 2014. № 2. С. 52–56.
8. Цумарев, Ю. А. Влияние конструкции нахлесточного сварного соединения на его напряженно-деформированное состояние / Ю. А. Цумарев, Е. Ю. Латыпова, Е. Н. Цумарев // Сварочное производство. 2012. № 8. С. 29–33.
9. Шелег, В. К. Мероприятия по повышению эффективности контактной точечной сварки / В. К. Шелег, Ю. А. Цумарев, Е. Н. Цумарев // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В: Промышленность. Прикладные науки. 2013. № 3. С. 61–65.
10. Цумарев, Ю. А. Распределение напряжений и деформаций в нахлесточном сварном соединении при изгибе / Ю. А. Цумарев, В. К. Шелег, Е. Н. Цумарев // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2012. № 2. С. 116–122.
11. Цумарев, Ю. А. Экспериментальное определение циклической прочности паяных соединений / Ю. А. Цумарев // Сварочное производство. 2009. № 10. С. 37–42.
12. Цумарев, Ю. А. Образцы для определения циклической прочности паяных соединений методом изгиба с вращением / Ю. А. Цумарев, И. В. Тарасенко // Сварочное производство. 2004. № 2. С. 17–18.
13. Цумарев, Ю. А. Термические напряжения в телескопических паяных соединениях разнородных металлов / Ю. А. Цумарев, И. И. Силин, В. П. Березиенко // Автоматическая сварка. 1975. № 3. С. 21–22.
14. Цумарев, Ю. А. Снижение концентрации напряжений в тавровых неразъемных соединениях / Ю. А. Цумарев, Е. В. Игнатова, Е. Н. Цумарев // Сварочное производство. 2013. № 5. С. 12–16.
15. Латыпова, Е. Ю. Составные конструктивные элементы для неразъемных соединений / Е. Ю. Латыпова, Ю. А. Цумарев // Сварочное производство. 2016. № 3. С. 33–38.
16. Цумарев, Ю. А. Методика оценки прочности паяных соединений стыкового типа / Ю. А. Цумарев // Технология машиностроения. 2009. № 3. С. 23–26.
17. Цумарев, Ю. А. Преимущества современных разновидностей паяных соединений / Ю. А. Цумарев, Е. В. Игнатова, Т. С. Латун // Стандартизация. 2013. № 2. С. 29–32.
18. Цумарев, Ю. А. Предложения по изменению стандартов на конструктивные элементы сварных соединений / Ю. А. Цумарев, А. А. Радченко, В. П. Куликов // Сварочное производство. 2012. № 4. С. 49–51.
19. Патон, Б. Е. О повышении несущей способности и долговечности сварных конструкций / Б. Е. Патон, В. И. Труфяков // Автоматическая сварка. 1982. № 2. С. 1–6.

20. Цумарев, Ю. А. Контактная точечная сварка со специальной подготовкой свариваемых кромок / Ю. А. Цумарев // Автоматическая сварка. 2010. № 3. С. 59–61.
21. Влияние изгиба на концентрацию напряжений в паяных соединениях / Ю. А. Цумарев [и др.] // Сварочное производство. 2015. № 9. С. 43–45.
22. Снижение концентрации напряжений в сварных соединениях с помощью пайки / Ю. А. Цумарев [и др.] // Сварочное производство. 2014. № 3. С. 30–33.
23. Цумарев, Ю. А. Влияние асимметрии односторонних стыковых швов на распределение напряжений в сварном соединении / Ю. А. Цумарев // Сварка и диагностика. 2010. № 5. С. 24–27.
24. Цумарев, Ю. А. Прочность паяных соединений / Ю. А. Цумарев. Могилев: Белор.-Рос. ун-т, 2011. 174 с.
25. Tsumarev, Yu. A. Carrying Capacity of Braced Soldered Joints / Yu. A. Tsumarev, E. V. Ignatova // Russian Engineering Research. 2011. No 9. P. 865–867.

Поступила 19.02.2018

Подписана в печать 23.04.2018

Опубликована онлайн 28.09.2018

REFERENCES

1. Tsumarev Yu. A. (2010) Critical Approach to Creation of Design Shapes for Soldered Joints. *Svarochnoye Proizvodstvo* [Welding Engineering], (3), 34–38 (in Russian).
2. Tsumarev Yu. A. (2011) Obtaining of Combined Permanent Joints. *Svarochnoye Proizvodstvo* [Welding Engineering], (4), 42–46 (in Russian).
3. O'Connor J., McDermott I. (1997) *The Art of Systems Thinking*. Thorsons. 288.
4. Ashby W. R. (1956) *An Introduction to Cybernetics*. New York, J. Wiley. 295. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.5851>.
5. Volkova V. N., Denisov A. A. (2006) *Theory of Systems*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 511 (in Russian).
6. Tsumarev Yu. A. (2011) Calculation of Stress and Deformed State for Overlap Joints. *Svarka i Diagnostika* [Welding and Diagnostics], (2), 14–18 (in Russian).
7. Sheleg V. K., Tsumarev Yu. A., Ignatova E. V. (2014) Influence of Geometric Dimensions of Soldered Overlap Joint on Stress and Deformed State. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, (2), 52–56 (in Russian).
8. Tsumarev Yu. A., Latypova E. Yu., Tsumarev E. N. (2012) Influence of Soldered Overlap Joint Design on its Stress and Deformed State. *Svarochnoye Proizvodstvo* [Welding Engineering], (8), 29–33 (in Russian).
9. Sheleg V. K., Tsumarev Yu. A., Tsumarev E. N. (2013) Measures on Improvement of Efficiency in Contact Spot Welding. *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya B: Promyshlennost' = Herald of Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Sciences*, (3), 61–65 (in Russian).
10. Tsumarev Yu. A., Sheleg V. K., Tsumarev E. N. (2012) Distribution of Stresses and Deformations in Welded Lap Joint under Bending. *Vestsi Natsyyanal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seriya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, (2), 116–122 (in Russian).
11. Tsumarev Yu. A. (2009) Experimental Determination of Cyclic Strength in Soldered Joints. *Svarochnoye Proizvodstvo* [Welding Engineering], (10), 37–42 (in Russian).
12. Tsumarev Yu. A., Tarasenko I. V. (2004) Specimens for Determination of Cyclic Strength in Soldered Joints while Using Bending Method with Rotation. *Svarochnoye Proizvodstvo* [Welding Engineering], (2), 17–18 (in Russian).
13. Tsumarev Yu. A., Silin I. I., Berezenko V. P. (1975) Thermal Stresses in Telescopic Soldered Joints of Dissimilar Metals. *Avtomaticheskaya Svarka = Automatic Welding*, (3), 21–22 (in Russian).
14. Tsumarev Yu. A., Ignatova E. V., Tsumarev E. N. (2013) Reducing the Stress Concentration in Permanent T-Joints. *Svarochnoye Proizvodstvo* [Welding Engineering], (5), 12–16 (in Russian).
15. Latypova E. Yu., Tsumarev Yu. A. (2016) Composite Structural Elements for Permanent Joints. *Welding International*, 31 (3), 242–246. <https://doi.org/10.1080/09507116.2016.1243755>.
16. Tsumarev Yu. A. (2009) Methodology for Assessment of Strength in Soldered Butt Joints. *Tekhnologiya Mashinostroeniya* [Technology of Mechanical Engineering], (3), 23–26 (in Russian).
17. Tsumarev Yu. A., Ignatova E. V., Latun T. S. (2013) Advantages in Modern Variety of Soldered Joints. *Standartizatsiya* [Standardization], (2), 29–32 (in Russian).
18. Tsumarev Yu. A., Radchenko A. A., Kulikov V. P. (2012) Proposals on Changing Standards for Structural Elements of Welded Joints. *Svarochnoye Proizvodstvo* [Welding Engineering], (4), 49–51 (in Russian).
19. Paton B. E., Trufiyakov V. I. (1982) On Improvement of Bearing Capacity and Longevity of Welded Structures. *Avtomaticheskaya Svarka* [Automatic Welding], (2), 1–6 (in Russian).
20. Tsumarev Yu. A. (2010) Contact Spot Welding with Special Preparation of Edges to be Welded. *Avtomaticheskaya Svarka* [Automatic Welding], (3), 59–61 (in Russian).
21. Tsumarev Yu. A., Ignatova E. V., Latypova E. Yu., Latun T. S. (2015) Influence of Bending on Stress Concentration in Soldered Joints. *Svarochnoye Proizvodstvo* [Welding Engineering], (9), 43–45 (in Russian).
22. Tsumarev Yu. A., Tsumarev E. N., Ignatova E. V., Latypova E. Yu. (2014) Reducing Stress Concentration in Welded Joints by Brazing. *Welding International*, 29 (3), 227–229. <https://doi.org/10.1080/09507116.2014.911425>.
23. Tsumarev Yu. A. (2010) Influence of Asymmetry in One-side Butt Joints on Stress Distribution in Welded Joints. *Svarka i Diagnostika* [Welding and Diagnostics], (5), 24–27 (in Russian).
24. Tsumarev Yu. A. (2011) *Strength of Soldered Joints*. Mogilev, Belarusian-Russian University. 174 (in Russian).
25. Tsumarev Yu. A., Ignatova E. V. (2011) Carrying Capacity of Braced Soldered Joints. *Russian Engineering Research*, (9), 865–867. <https://doi.org/10.3103/s1068798x11090255>.

Received: 19.02.2018

Accepted: 23.04.2018

Published online: 28.09.2018

Газодинамические характеристики тлеющего разряда при ионном азотировании

Канд. физ.-мат. наук М. Н. Босьяков¹⁾, А. А. Козлов²⁾

¹⁾Физико-технический институт НАН Беларуси (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Министерство промышленности Республики Беларусь (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Ионно-плазменное азотирование в тлеющем разряде – широко используемый метод поверхностного упрочнения в промышленно развитых странах мира. Ионно-плазменное азотирование – наиболее современный и технологичный вид поверхностного упрочнения деталей машин, пресс-форм, штампов и режущего инструмента. Однако в литературе отсутствует подробное описание технических характеристик и функционирования газовакуумной части установок ионного азотирования, что не позволяет оценить расход электроэнергии на работу газовакуумной системы при оценке эффективности использования данного оборудования. Рассмотрены вопросы взаимосвязи газодинамических параметров процесса азотирования (давление и расход газов) и энергетических характеристик тлеющего разряда (плотность тока, напряжение разряда) при ионном азотировании на установках промышленного типа и их влияние на процесс. На основании расчетно-практического моделирования вакуумной системы установки ионного азотирования показано, что для обеспечения независимого управления скоростью откачки и расходом газовой смеси целесообразно использовать вакуумные агрегаты – последовательно соединенные форвакуумный и двухроторный насосы. Это позволяет проводить процессы азотирования в широком диапазоне давлений при возможности обеспечивать большие расходы плазмообразующего газа при низком давлении в случае обработки больших площадей. Выявлены взаимосвязи температуры, давления в камере и плотности тока тлеющего разряда, обеспечивающие его существование в виде аномального. Показано, что чем ниже рабочее давление при проведении процесса, тем большую степень аномальности разряда можно обеспечить при одинаковой температуре садки и тем самым – большую температурную однородность, обеспечивающую равномерность азотированного слоя на всех деталях садки.

Ключевые слова: ионно-плазменное азотирование, газодинамические параметры, вакуумная система, расчетно-практическое моделирование

Для цитирования: Босьяков, М. Н. Газодинамические характеристики тлеющего разряда при ионном азотировании / М. Н. Босьяков, А. А. Козлов // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 5. С. 368–377. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-368-377>

Gas-Dynamic Specifications of Glow Discharge During Ion Nitriding Process

М. N. Bosyakov¹⁾, A. A. Kozlov²⁾

¹⁾The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Ministry of Industry of the Republic of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Ion-plasma nitriding in glow discharge is a widely used method of surface hardening in the industrialized countries of the world and it is the most modern and technological type of surface hardening of machine parts, molds, dies and cutting tools. However there is no detailed review in the literature of technical characteristics and operation of a gas-vacuum part in ion nitriding units and it does not allow estimating electric power consumption for operation of a gas-vacuum system

Адрес для переписки

Козлов Алексей Александрович
Министерство промышленности Республики Беларусь
пр. Партизанский, 2, корп. 4
220033, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 330-05-31
alex-ett@tut.by

Address for correspondence

Kozlov Aleksey A.
Ministry of Industry of the Republic of Belarus
2, k. 4 Partizansky Ave.,
220033, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 330-05-31
alex-ett@tut.by

while assessing efficiency of the given equipment. The paper considers problems pertaining to relationship of gas-dynamic parameters of the nitriding process (pressure and gas flow rate) and energy characteristics of the glow discharge (current density, discharge voltage) during ion nitriding at industrial plants and their impact on the process. Calculation-practical modeling of a vacuum system for an ion nitriding installation shows that it is advisable to use vacuum units which represent consistently connected forevacuum and two-rotor pumps in order to ensure independent control of a pumping speed and flow rate of the gas mixture. Such approach makes it possible to carry out nitriding processes in a wide range of pressures with the possibility to provide high plasma gas rates at a low pressure, in particular, when processing large areas. The paper has revealed temperature interrelations, chamber pressure and glow discharge current density that ensure its existence in the abnormal form. It has been shown that at lower operational pressure during the process, higher degree of discharge abnormality can be provided at uniform temperature of the batch. Due to this it is possible to attain higher temperature similarity which ensures uniformity of a nitrided layer on all parts of the batch.

Keywords: ion-plasma nitriding, gas-dynamic parameters, vacuum system, calculation-practical modeling

For citation: Bosyakov M. N., Kozlov A. A. (2018) Gas-Dynamic Specifications of Glow Discharge During Ion Nitriding Process. *Science and Technique*. 17 (5), 368–377. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-368-377> (in Russian)

Введение

Одним из наиболее эффективных и широко применяемых в промышленности методов повышения долговечности многих ответственных деталей является их химико-термическая обработка, воздействующая на поверхностные слои металла, т. е. на те слои, в которых концентрируются максимальные напряжения, возникают трещины, развиваются процессы износа и коррозии.

Химико-термическая обработка металлов и сплавов заключается в нагреве и выдержке их при необходимой температуре в активных газовых, жидких или твердых средах, в результате чего изменяются химический состав, структура и свойства поверхностных слоев металлов и сплавов

Ионное-плазменное азотирование (ИПА) в тлеющем разряде, как один из методов химико-термической обработки, – широко используемый метод поверхностного упрочнения в промышленно развитых странах мира. ИПА является наиболее современным и технологичным видом поверхностного упрочнения деталей машин, пресс-форм, штампов и режущего инструмента.

Для реализации процесса упрочняющей обработки методом ионного азотирования в ряде стран (Германия, Австрия, США, Япония, Болгария, Бразилия, Китай, Беларусь и др.) производится высокотехнологичное автоматизированное оборудование – установки ионного азотирования, – которое позволило избавиться от таких недостатков газового азотирования, как длительное время процесса, повышенная хруп-

кость слоя, трудоемкость процесса, нестабильность получаемых результатов [1–5].

Установки ионного азотирования состоят из следующих основных функциональных систем: вакуумной камеры, оснащенной узлом катодного токоввода; вакуумной системы; электрического блока питания плазмы тлеющего разряда с дугогашением; блока подачи рабочих газов; системы контроля и управления, внешних нагревателей, размещаемых либо снаружи вакуумной камеры, либо внутри; системы теплоизоляции. Современное оборудование для ионного азотирования создается с различными типами вакуумных камер: шахтные, колпаковые и комбинированные, состоящие из двух-трех частей для увеличения высоты рабочего пространства. Полезный диаметр камер (размер рабочего пространства) составляет от нескольких дециметров до 2000 мм и более, высота – от 750 до 7500 мм. Оснастка, размещаемая внутри камеры, может быть разнообразной и определяется конфигурацией упрочняемых изделий [1–5].

Следует отметить, что в литературе отсутствует подробное описание технических характеристик и функционирования газовакуумной части установок ионного азотирования, что не позволяет оценить расход электроэнергии на работу газовакуумной системы при оценке эффективности использования данного оборудования. Для любой вакуумной установки важно определить оптимальное значение коэффициента использования насоса (насосов) из экономических соображений. При этом необходимо учитывать, что при увеличении коэффициента использования насоса уменьшаются затраты,

связанные с приобретением и эксплуатацией вакуумных насосов, но увеличиваются расходы на изготовление трубопроводов и арматуры.

Расчет вакуумной системы

Технологическими факторами, влияющими на эффективность ионного азотирования, являются температура процесса, продолжительность насыщения, давление, состав и расход рабочей газовой смеси. На установках ионного азотирования можно проводить как азотирование, так и карбонитрирование, для чего в состав рабочей смеси газов должен входить углеродсодержащий газ – метан, ацетилен либо пропан-бутан. Для создания тлеющего разряда вокруг поверхности детали можно использовать переменный и постоянный (либо пульсирующий) ток. Мощность блоков питания рассчитывается в соответствии с габаритами рабочего пространства камер и в настоящее время составляет от 20 до 450 кВ·А [6].

Вакуумная система установок ионного азотирования состоит из форвакуумного насоса (золотникового либо пластинчато-роторного) либо откачного агрегата, включающего последовательно соединенные форвакуумный насос и двухроторный насос (насос Рутса), вакуумной магистрали и соответствующих клапанов – электромагнитных либо электропневматических. Время первичной откачки камеры (так называемый неустановившийся режим работы) зависит от производительности откачного агрегата (насоса), объема вакуумной камеры установки, длины вакуумной магистрали и ее диаметра и, как правило, составляет порядка 10–40 мин. Для изменения давления в камере варьируется производительность откачной системы (если такая возможность имеется) либо изменяется расход газовой смеси, используемой для азотирования.

В течение всего процесса азотирования давление регулируется путем поддержания необходимого расхода азотсодержащего газа. Для получения газовой среды, в которой проводится азотирование, либо смешивают соответствующие баллонные газы, либо подводят смесь из специальных газосмесительных установок.

Следует отметить, что детальное рассмотрение взаимосвязи газодинамических парамет-

ров камеры установки (давление газа, расход газов) и энергетических характеристик тлеющего разряда (плотность тока, напряжение разряда, длительность импульса напряжения и паузы между импульсами) в литературе отсутствует. В [6–9] приводятся лишь данные по максимальному расходу газа для конкретной модели установки и диапазон рабочих давлений (как правило, это диапазон давлений от 100 до 800 Па).

Поэтому рассмотрение взаимосвязи данных параметров является важным фактором в понимании процесса ионного азотирования и определении его экономических показателей.

Цикл азотирования в тлеющем разряде включает несколько стадий: вакуумирование камеры до некоторого предельного давления, после чего на катод-садку подается напряжение и между катодом и анодом возбуждается тлеющий разряд: начинается процесс очистки и разогрева садки – это неустановившийся режим откачки, который является вязкостным режимом, поскольку длина свободного пробега молекул газа λ много меньше диаметра трубопровода d ($\lambda \leq d$).

Длина откачной магистрали зависит от конфигурации участка ионного азотирования, т. е. от взаимного расположения вакуумного насоса и рабочей камеры. На практике следует стремиться к обеспечению минимального расстояния между камерой и насосом, а диаметр откачной магистрали выбирать исходя из планируемых величин давления в камере на стадии выдержки и расхода плазмообразующего газа. Следовательно, давление в камере, расход газа и параметры откачной магистрали (длина магистрали и диаметр трубы) находятся в жесткой взаимосвязи. Поэтому необходимо иметь в виду все эти параметры при назначении режима обработки реальной садки деталей на установке промышленного типа, где азотируемая площадь деталей может составлять десятки квадратных метров.

Во время откачки вакуумной системы давление газа в ней уменьшается, и одновременно с этим меняются режимы течения газа в трубопроводах. Вязкостный режим течения наблюдается при низком вакууме, когда выполняется условие

$$\text{Kn} = \frac{\lambda}{d} \leq 5 \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где Kn – критерий Кнудсена [10], что соответствует

$$\bar{p}d \geq 1,33 \text{ Па} \cdot \text{м}, \quad (2)$$

p – давление, Па; d – диаметр трубопровода, м.

Из этого выражения можно определить величину предельного давления в камере (при известном диаметре трубопровода), при котором режим течения газа будет вязкостным. Тем самым будет обеспечиваться максимальная проводимость магистрали и, следовательно, минимальное время откачки камеры.

Проводимость круглого трубопровода при вязкостном режиме течения газа обратно пропорциональна его длине и коэффициенту динамической вязкости газа, прямо пропорциональна среднему давлению в трубопроводе и четвертой степени радиуса трубопровода [10]. Для воздуха при $T = 293 \text{ К}$ и $\eta = 1,82 \cdot 10^{-5} \text{ Н/(м}^2 \cdot \text{с)}$ эту формулу можно преобразовать к виду

$$U_{\text{тв}} = 1,36 \cdot 10^3 \cdot \frac{d^4}{l} \cdot \frac{p_1 + p_2}{2}, \quad (3)$$

где d, l – в м; p – в Па; $U_{\text{тв}}$ – в $\text{м}^3/\text{с}$; p_1, p_2 – давление в начале и конце трубопровода.

В рабочем режиме, на стадии изотермической выдержки в зависимости от площади обрабатываемых деталей и марки стали требуется обеспечить расход газа на уровне 100 л/ч и более при рабочем давлении то 80 до 500 Па – это стационарный режим откачки. Таким образом, откачная система установки должна обеспечивать, с одной стороны, минимальное время откачки камеры, с другой – поддержание необходимого давления в достаточно широких пределах расходов рабочих газов.

Производительность откачной системы установки – «насос + вакуумная магистраль» – определяется скоростью откачки насоса (или насосов) и пропускной способностью вакуумной магистрали. Таким образом, регулировка давления в камере может осуществляться тремя способами: изменением расхода плазмообразующего газа, изменением скорости откачки насоса (если таковая возможность имеется) или

изменением пропускной способности магистрали. Если известны длина магистрали, диаметр трубопровода и величина предельного давления, то скорость откачки (производительность) насоса можно вычислить из следующего выражения [10]:

$$S_{\text{н}} = \frac{2,3V \lg p_1 / p_2}{(t_2 - t_1) - \frac{V}{C} \left(\frac{1}{p_2} - \frac{1}{p_1} \right)}, \quad (4)$$

где V – объем вакуумной камеры, м^3 ; p_1, p_2 – начальное и конечное давление, Па (10^5); t_1 – начало откачки, с; t_2 – время откачки, с; $C = 1360d^4/l$ – константа, зависящая от геометрии трубопровода.

Таким образом, по известным данным относительно параметров откачной магистрали и объема вакуумной камеры рассчитывается необходимая скорость откачки насоса и соответственно выбирается насос с нужной быстротой откачки. Следующим этапом расчета вакуумной системы является определение эффективной скорости откачки в стационарном режиме – на стадии изотермической выдержки. Исходя из закона сохранения потока газа, можно определить взаимосвязь рабочего давления в камере, эффективной скорости откачки вакуумного насоса и расхода газа:

$$p_{\text{атм}} G_{\text{газа}} = p_{\text{раб}} S_{\text{эф}}, \quad (5)$$

где $p_{\text{атм}}$ – атмосферное давление (при нормальных условиях это $1013 \cdot 10^2$ Па); $G_{\text{газа}}$ – объемный расход газа при нормальных условиях (л/ч либо $\text{м}^3/\text{с}$); $p_{\text{раб}}$ – рабочее давление в камере (Па); $S_{\text{эф}}$ – эффективная скорость откачки системы «насос + вакуумная магистраль» ($\text{м}^3/\text{с}$ либо л/с).

Расчетные значения необходимой эффективной скорости откачки для поддержания нужного рабочего давления в камере при различных расходах газа (л/ч) приведены на рис. 1.

Как видно из представленных данных, повышение расхода газа при фиксированном давлении в камере требует увеличения скорости откачки, что налагает определенные требования на выбор откачного агрегата – вакуумного насоса и параметров откачной магистрали.

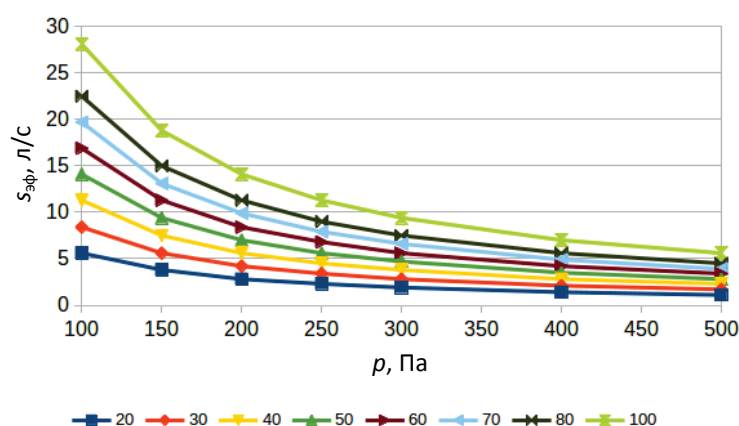


Рис. 1. Взаимосвязь эффективной скорости откачки, расхода газа и давления в камере

Fig. 1. Interrelation of pumping speed, gas consumption and chamber pressure

Из основного уравнения вакуумной техники [10]

$$\frac{1}{S_{\text{эф}}} = \frac{1}{S_{\text{н}}} + \frac{1}{U_{\text{маг}}}, \quad (6)$$

где $S_{\text{н}}$ – скорость откачки насоса; $U_{\text{маг}}$ – производительность вакуумной магистрали.

Откуда следует, что для обеспечения расхода газа на уровне 100 л/ч при давлении 100 Па (рис. 1) эффективная скорость откачки должна быть на около 28 л/с, а номинальная скорость откачки насоса – более 30 л/ч, поскольку коэффициент использования механических насосов имеет величину от 0,7 до 0,9 в зависимости от количества элементов в вакуумной магистрали между рабочей камерой и насосом [10].

Поскольку скорость откачки форвакуумных насосов является постоянной величиной в достаточно большом интервале рабочих давлений [10, 11], суммарная производительность системы будет определяться пропускной способностью магистрали.

Если известны максимальный расход рабочих газов и диапазон рабочих давлений, то из (3) и (4) можно рассчитать необходимую пропускную способность вакуумной магистрали и, следовательно, выбрать нужные характеристики магистрали – диаметр и длину, учитывая условие (2). Как было рассмотрено ранее, диапазон рабочих давлений при ионном азотировании составляет 100–800 Па, а расход рабочих газов – от 20 до 100 л/ч. В соответствии с расчетными данными, представленными на рис. 1,

этим параметрам соответствует эффективная скорость откачки в интервале от 3 до 30 л/с. Следовательно, в большинстве случаев будет достаточно вакуумного насоса с производительностью на уровне 20 л/с, например, АВЗ-20Д, ADVAVAC-75 и др. Но при этом необходимо иметь вакуумную магистраль с внутренним диаметром и длиной такими, чтобы эффективная скорость откачки была близка к скорости откачки вакуумного насоса. Расчетные значения эффективной скорости откачки системы «насос – магистраль» для магистрали длиной 2000 мм и различным внутренним диаметром (при этом скорость откачки насоса при нималась на уровне 20 л/с) представлены на рис. 2.

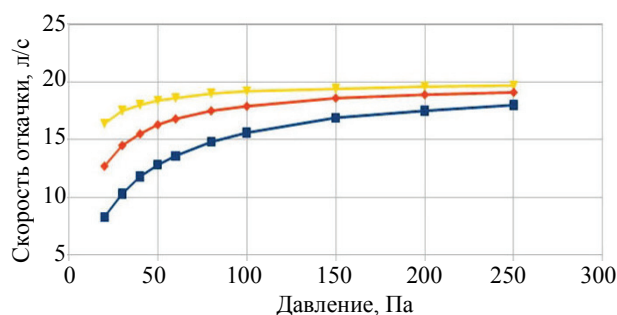


Рис. 2. Эффективная скорость откачки системы «насос – магистраль» при различных давлениях в зависимости от диаметра откачной магистрали: треугольники – диаметр 51 мм; ромбы – 40 мм; квадраты – 32 мм

Fig. 2. Efficient pumping speed of “pump – main line” system at various pressure according to diameter of pumping main line: triangles – diameter 51 mm; rhombs – 40 mm; squares – 32 mm

Представленные данные показывают, что увеличение диаметра откачной магистрали минимизирует влияние магистрали на эффективную скорость откачки.

Первичная откачка камеры проводится, как правило, до такого предельного давления, чтобы режим течения газа был вязкостным, и обеспечивалась максимальная пропускная способность магистрали. Так, для приведенных диаметров трубопроводов предельное давление в соответствии с (2) составляет для диаметра: 32 мм – 42 Па, 40 мм – 33 Па и 51 мм – 26 Па. Время откачки до некоторого предельного давления $p_{\text{пред}}$ определяется объемом камеры $V_{\text{кам}}$ и скоростью откачки насоса S_n из (4) как:

$$t_{\text{отк}} = 2,3 \left(\frac{V_{\text{кам}}}{S_n} \right) \lg \left(\frac{1,013 \cdot 10^5}{p_{\text{пред}}} \right) - \frac{V_{\text{кам}}}{C} \left(\frac{1}{p_{\text{пред}}} - \frac{1}{1,013 \cdot 10^5} \right). \quad (7)$$

Как видно из приведенных на рис. 2 данных, при расчете времени откачки в качестве $S_{\text{эф}}$ можно использовать уменьшенную на 10–12 % скорость откачки насоса. Расчеты по (7) показывают, что время откачки вакуумной камеры с объемом 2 м^3 до предельного давления 30 Па составляет порядка 12–15 мин, а камеры объемом 5 м^3 – 30–35 мин, что является несущественным при выдержке, например, в течение 14–16 ч.

Однако при работе на высоком давлении (250–800 Па) для обеспечения баланса «расход газа – давление» при скорости откачки порядка 20 л/с (рис. 1) необходимо существенно увеличивать расход газа, что, с точки зрения обеспечения необходимого количества химически активной среды (атомарного азота), является совершенно неоправданным и приводит к значительному перерасходу газов. Более оптимальный вариант – управление скоростью откачки путем использования двух насосов – форвакуумного, типа упомянутых выше, и двухроторного, типа ДВН-50 (НВР-200), соединенных последовательно. В таком случае изменением частоты вращения ротора насоса ДВН-50 можно управлять скоростью откачки вакуумного агрегата, состоящего из двух насосов. Зависимость скорости откачки вакуумного агрегата,

состоящего из насосов ADVAVAC-75 и ДВН-50, от частоты вращения электродвигателя насоса ДВН-50 представлена на рис. 3.

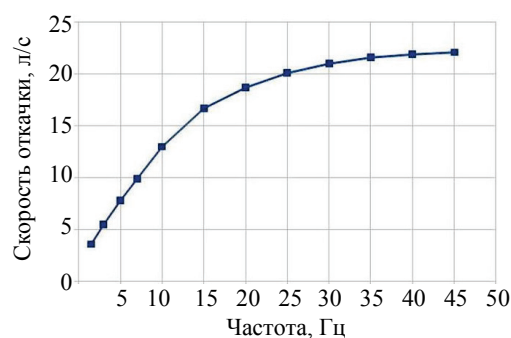


Рис. 3. Частотная зависимость скорости откачки вакуумного агрегата ADVAVAC-75 + ДВН-50

Fig. 3. Frequency dependence of pumping speed for vacuum unit ADVAVAC-75 + ДВН-50

Как видно из представленной зависимости, путем изменения частоты вращения ротора можно в широких пределах управлять скоростью откачки вакуумного агрегата и эффективной скоростью откачки системы «насос – вакуумная магистраль», что обеспечивает независимое управление расходом газа и скоростью откачки, и следовательно, давлением в камере.

Таким образом, на основании проведенного расчетного моделирования вакуумных параметров установки ионного азотирования выявлено, что для обеспечения независимой управляемости расходом газа и давлением в камере необходимо использовать откачной агрегат, состоящий из последовательно соединенных форвакуумного (пластинчато-роторного либо золотникового) и двухроторного насосов типа ДВН (или аналогичных). Использование частотного преобразователя для вариации частоты вращения двухроторного насоса обеспечивает достаточно широкий диапазон управления эффективной скоростью откачки. Это позволяет проводить процессы азотирования как при низком давлении и большом расходе газа, так и при высоком давлении в камере при относительно небольших расходах плазмообразующего газа. Все эти факторы в целом обеспечивают широкие пределы параметров процесса азотирования по величине площади обрабатываемых деталей, минимизацию расхода активных газов и электроэнергии для питания вакуумных насосов, поскольку с ростом скорости откачки

насоса увеличивается соответственно и мощность электродвигателя.

Выбор рабочего давления

Таким образом, мы подошли к моменту выбора рабочего давления при проведении процесса ионного азотирования. С одной стороны, давление определяется параметрами насоса, откачной магистрали и расхода газа, с другой – оно должно быть таким, чтобы тлеющий разряд существовал в «аномальном» виде. Это значит, что при увеличении прикладываемого напряжения ток должен возрасти, и весь катод-садка должен быть покрыт свечением разряда.

Тлеющий разряд постоянного или пульсирующего тока, используемый для ионного азотирования, обязательно должен быть «аномального» типа, т. е. рабочий диапазон «ток – напряжение» должен быть в области 2, где имеет место возрастающая вольт-амперная характеристика (рис. 4) [12].

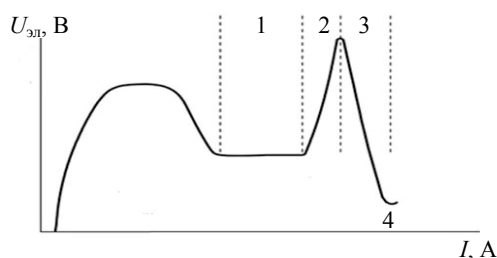


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика тлеющего разряда

Fig. 4. Current-voltage characteristic of glow discharge

В свою очередь, вольт-амперная характеристика разряда зависит от рабочего давления в камере. Как было показано в [13], для обеспечения необходимой температуры садки на стадии выдержки затрачивается определенная мощность разряда, которая не зависит от давления в камере [14], а определяется теплообменом садки со стенками камеры. Аномальный режим тлеющего разряда предполагает определенную взаимосвязь плотности разрядного тока и катодного падения потенциала как функции давления. Эта зависимость для ряда газов показана на рис. 5 [15].

Как следует из приведенных данных, в достаточно большом интервале значений j/p^2 величина катодного падения потенциала незначительно отличается от значений нормального

катодного падения (на графике рис. 5 обозначено кружками). А это означает, что при определенных величинах давления и тока разряд может существовать в двух видах: аномальном и частично нормальном, т. е. увеличение прикладываемого напряжения будет приводить лишь к росту тока и при определенных сочетаниях «ток – давление» на части садки разряд может вообще отсутствовать, что является недопустимым.

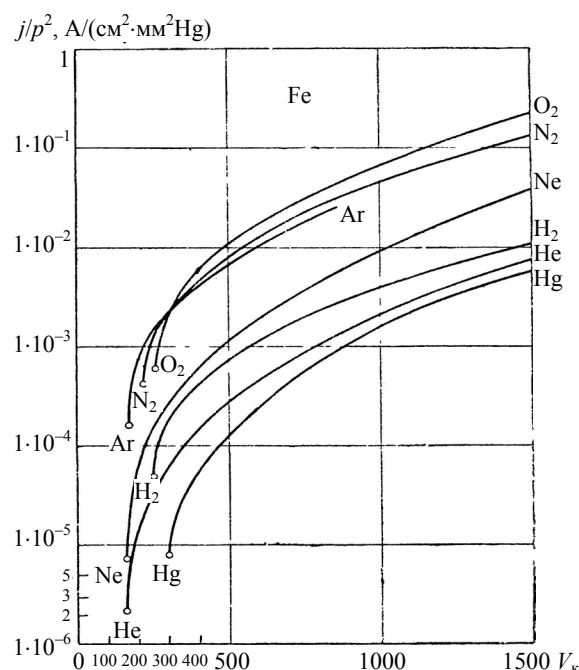


Рис. 5. Зависимость относительной плотности тока тлеющего разряда с железным катодом от катодного падения потенциала

Fig. 5. Dependence of relative current density of glow discharge with iron cathode on cathode potential fall

Рассмотрим типичные значения параметров процесса ионного азотирования на промышленном оборудовании. Например, при обработке садки деталей площадью 24 м² (рис. 6) при температуре 540 °С ток разряда составляет 85 А, напряжение – 380 В.

Какой диапазон давлений обеспечит существование тлеющего разряда в форме аномального, чтобы вся садка была покрыта разрядом? Если считать величину катодного падения потенциала на уровне 85 % от приложенного напряжения [15], то для рассматриваемого случая величина $U_{кпп}$ будет 323 В. Из данных рис. 5 для азота значению $U_{кпп} = 323 В$ соответ-

ствуется приведенная плотность тока $j/p^2 = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ A}/(\text{см}^2 \cdot \text{мм}^2 \text{ рт. ст.})$. Из этого значения можно вычислить приведенное давление, т. е. давление, соответствующее температуре катода-садки $T = 540^\circ\text{C}$ [16]:

$$p_{\text{прив}} = \frac{p_{\text{изм}} \cdot 300}{T_{\text{кат}}}, \quad (8)$$

где $p_{\text{изм}}$ – давление в камере, измеренное в холодной зоне, Па; $T_{\text{кат}}$ – температура катода-садки, К.



Рис. 6. Садка деталей общей площадью 24 м^2

Fig. 6. Shrinking of parts with total area of 24 м^2

Для приведенных условий обработки $j = 3,54 \text{ A}/\text{м}^2$, $T_{\text{кат}} = 813 \text{ K}$ расчетное значение $p_{\text{изм}} = 130 \text{ Па}$. Следовательно, повышение давления сверх данного значения может привести к тому, что j/p^2 уменьшится и, как это видно из зависимостей на рис. 5, величина катодного падения потенциала будет близка к нормальному. А это может привести к тому, что на части садки разряд может не существовать и, следовательно, не будет обработки.

Полученные в [13] расчетные значения $p_{\text{эл}}$ позволяют определять диапазон рабочих давлений при разогреве и выдержке, чтобы, во-первых, обеспечивалось плотное «облегание» разрядом поверхности изделий и получение равномерного азотированного слоя, и во-вторых, разряд оставался бы аномальным, т. е. чтобы выполнялось условие $J_{\text{разр}} \geq J_{\text{н}}^{N_2}(P, T)$, где $J_{\text{разр}}$ – плотность разрядного тока; $J_{\text{н}}^{N_2}$ – нормальная плотность тока для азота – компонента

рабочей смеси, имеющего максимальное значение $J_{\text{н}}$ при конкретных значениях давления в камере и температуры садки. Значения $J_{\text{н}}$ для азота [14], рассчитанные по формуле, применяемой для разрядов с плоскими электродами [17], приведены на рис. 7:

$$J_{\text{н}} = 4 \left(\frac{p}{p_{\text{н}}} \cdot \frac{T_{\text{н}}}{T} \right)^2, \quad (9)$$

где p – рабочее давление; $p_{\text{н}} = 133 \text{ Па}$; $T_{\text{н}} = 300 \text{ K}$; T – температура газа в катодной области разряда, которая принималась равной температуре катода.

Как видно из представленных данных, с одной стороны, по мере повышения температуры в камере плотность тока, обеспечивающая существование разряда в виде аномального при одинаковом давлении, снижается. С другой, при одинаковой температуре рост давления в камере приводит к повышению плотности тока, что необходимо учитывать при выборе режима обработки, как это приведено в примере выше.

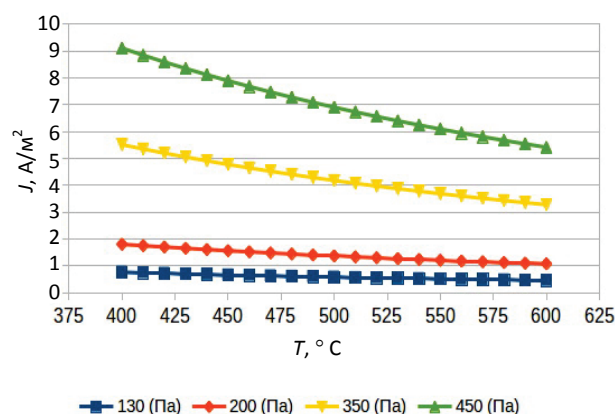


Рис. 7. Расчетные значения нормальной плотности тока при различных давлениях в зависимости от температуры катода

Fig. 7. Calculation values of normal current density at various pressure according to cathode temperature

Приведенные расчетные данные показывают, что повышение давления в камере при постоянной температуре садки приводит к росту плотности тока, поэтому при высоком рабочем давлении существует возможность тлеющему разряду существовать в двух формах – нормальной и аномальной, если катодное падение потенциала близко к нормальному. Согласно

но [15], величина нормального катодного падения потенциала в случае железного катода для азота составляет 215 В, для водорода – 250 В, для аргона – 165 В. Приведенные в [13] данные по сравнению реальной плотностью тока при обработке различных по массе и площади поверхности садок при температуре $T = 530\text{ }^{\circ}\text{C}$ с расчетной для данной температуры показали, что чем ниже рабочее давление, тем большую «степень аномальности» разряда $K = J_{\text{экс}}/J_{\text{расч}}$ можно обеспечить при одинаковой температуре садки (табл. 1).

Таблица 1

Значения экспериментальных
и рассчитанных величин J
Experimental and calculated values J

p , Па	$J_{\text{экс}}$, А/м ²	$J_{\text{расч}}$, А/м ²	$K = J_{\text{экс}}/J_{\text{расч}}$
194	3,36	1,15	2,92
194	3,40	1,15	2,96
196	4,30	1,16	3,70
197	3,60	1,20	3,00
200	4,26	1,30	3,28
313	5,18	3,10	1,67
318	5,68	3,20	1,78
342	5,10	3,70	1,38
362	5,00	4,20	1,19

Таким образом, чем выше рабочее давление при азотировании, тем больше шансов разряду быть частично «аномальным» и частично «нормальным», когда не вся поверхность садки может быть охвачена разрядом, особенно ее верхняя часть. Все эти факторы необходимо учитывать при разработке конкретных режимов азотирования на промышленном оборудовании: а именно – при конкретной мощности разряда на стадии выдержки плотность тока должна быть минимум в два раза больше значения нормальной плотности тока при данном давлении. Это гарантированно обеспечит существование разряда в виде аномального на всей поверхности катода-садки.

ВЫВОДЫ

1. Показана взаимосвязь основных газодинамических параметров установки ионного азотирования – скорости откачки, расхода газа и давления в камере.

2. На основании расчетно-практического моделирования вакуумной системы установки ионного азотирования показано, что для обеспечения независимого управления скоростью откачки и расходом газовой смеси целесообразно использовать вакуумные агрегаты – последовательно соединенные форвакуумный и двухроторный насосы. Это позволяет проводить процессы азотирования в широком диапазоне давлений при относительно небольших расходах плазмообразующего газа, что в целом обеспечивает минимизацию расхода активных газов и электроэнергии для питания вакуумных насосов.

3. Выявлены взаимосвязи температуры, давления в камере и плотности тока, обеспечивающие существование разряда в виде аномального. Показано, что чем ниже рабочее давление при проведении процесса, тем большую степень аномальности разряда можно получить при одинаковой температуре садки и тем самым большую температурную однородность, а также соответственно равномерность азотированного слоя на всех деталях садки.

ЛИТЕРАТУРА

- Берлин, Е. В. Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей / Е. В. Берлин, Н. Н. Коваль, Л. А. Сейдман. М.: Техносфера, 2012. 464 с.
- Пастух, И. М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде / И. М. Пастух. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2006. 364 с.
- Ионная химико-термическая обработка сплавов / Б. Н. Арзамасов [и др.]. М.: Изд-во МГТУ имени Баумана, 1999. 400 с.
- Теория и технология азотирования. / Ю. М. Лахтин [и др.]. М.: Металлургия, 1991. 320 с.
- Grun, R. Pulsed DC-Glow Discharge for PLasma Heat Treatment / R. Grun // Plasma Heat Treatment: International IFHT Seminar. Senlis France: PYC Edition, 1987. P. 417–423.
- Puls-Plasma Nitriding Units – www.nitron.com.br.
- Elektropuls Plasma-Nitrieren von Stählen Mit Niedriger Anlauftemperatur // Fachber Huttenprax Metallweiterverarb. 1987. Vol. 25, No 12. P. 1227.
- RUBIG Driving Success [Electronic resource]. Mode of access: <https://www.rubig.com/>.
- Plasma Nitriding Equipment [Electronic resource] // Ionotech LTD. Mode of access: www.ionotech.net/ru/.
- Розанов, Л. Н. Вакуумная техника / Л. Н. Розанов. М.: Высш. шк., 2007. 320 с.

11. Вакуумная техника / К. Е. Демихов [и др.]; под общ. ред. К. Е. Демихова, Ю. В. Панфилова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2009. 590 с.
12. Азотирование в пульсирующей плазме [Электронный ресурс] / ELTROPULS. Режим доступа: http://eltropuls.ru/plasma_nitriding.
13. Босьяков, М. Н. Энергетические параметры процессов ионного азотирования на промышленном оборудовании / М. Н. Босьяков, А. А. Козлов // Доклады БГУИР. 2013. Т. 73, № 3. С. 76–82.
14. Босьяков, М. Н. Выбор режима упрочняющей обработки на установках ионного азотирования промышленного типа / М. Н. Босьяков, А. Н. Моисеенко // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы VIII МНТК. Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2016. Кн. 2. С. 50–58.
15. Энгель, А. Физика и техника электрического разряда в газах / А. Энгель, М. Штенбек. Т. 2. ОНТИ-НКТП, 1936. 384с.
16. Голубев, В. С. Тлеющий разряд повышенного давления / В. С. Голубев, С. В. Пашкин. М.: Наука, 1990. 335 с.
17. Параметры области катодного падения потенциала самостоятельного нормального тлеющего разряда в гелии при атмосферном давлении / В. И. Архипенко [и др.] // Физика плазмы. 2002. Т. 28, № 10. С. 930–938.
5. Grun R. (1987) Pulsed DC–Glow Discharge for Plasma Heat Treatment. *Plasma Heat Treatment, International IFHT Seminar*. Senlis, France, PYC Edition, 417–423.
6. *Puls-Plasma Nitriding Units*. Available at: www.nitron.com.br.
7. Elektropuls Plasmanitrieren von Stählen mit Niedriger Anlempertemperatur. *Fachber. Huttenprax. Metallweiterverarb.*, 1987, 25 (12), 1227 (in German).
8. *RUBIG Driving Success*. Available at: <https://www.rubig.com/>
9. Plasma Nitriding Equipment. *Ionotech LTD*. Available at: www.ionitech.net/ru/.
10. Rozanov L. N. (2007) *Vacuum Technique*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 320 (in Russian).
11. Demikhov K. E., Panfilov Yu. V., Nikulin N. K., Avtonomova I. V. (2009) *Vacuum Technique*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ. 590 (in Russian).
12. Nitriding in Pulsing Plasma. *ELTROPULS*. Available at: http://eltropuls.ru/plasma_nitriding.
13. Bosyakov M. N., Kozlov A. A. (2013) Energetic Parameters of Ion Nitriding Processes in Industrial Equipment. *Doklady BGUIR*, 73 (3), 76–82 (in Russian).
14. Bosyakov M. N., Moiseenko A. N. (2016) Choice of Hardening Treatment Mode for Industrial ion Nitriding Units. *Sovremennyye Metody i Tekhnologii Sozdaniya i Obrabotki Materialov: Materialy VIII Mezhdunar. Nauch.-Tekh. Konf. Kn. 2* [Modern Methods and Technologies for Development and Treatment of Materials. Proceedings of 8th International Scientific and Technical Conference. Book 2.] Minsk, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 50–58 (in Russian).
15. Engel A., Shtenbek M. (1936) *Physics and Technology of Electric Discharge in Gases. Vol. 2*. Moscow, United Scientific and Technical Publishing House of People's Commissariat of Heavy Industry. 384 (in Russian).
16. Golubev V. S., Pashkin S. V. (1990) *Glow Discharge of Increased Pressure*. Moscow, Nauka Publ. 335 (in Russian).
17. Arkhipenko V. I., Zgirovskii S. M., Kirillov A. A., Simonchik L. V. (2002) Cathode Fall Parameters of a Self-Sustained Normal Glow Discharge in Atmospheric-Pressure Helium. *Plasma Physics Reports*, 28 (10), 858–865. <https://doi.org/10.1134/1.1513839/>.

Поступила 20.04.2018

Подписана в печать 22.06.2018

Опубликована онлайн 28.09.2018

REFERENCES

1. Berlin E. V., Koval N. N., Seidman L. A. (2012) *Plasma Chemical-Thermal Treatment of Steel Parts' Surface*. Moscow, Tekhnosfera Publ. 464 (in Russian).
2. Pastukh I. M. (2006) *Theory and Practice of Non-Hydrogen Nitriding in Glow Discharge*. Kharkov. National Science Center, Kharkov Institute of Physics and Technology. 364 (in Russian).
3. Arzamasov B. N., Bratukhin A. G., Eliseev Yu. S., Pannaioti T. A. (1999) *Ionic Chemical-Thermal Treatment of Alloys*. Moscow, Publishing House of Bauman Moscow State Technical University. 400 (in Russian).
4. Lakhtin Yu. M., Kogan Ya. D., Shpis G., Bemer Z. (1991) *Theory and Technology of Nitriding*. Moscow, Metallurgiya Publ. 320 (in Russian).

Received: 20.04.2018

Accepted: 22.06.2018

Published online: 28.09.2018

Формирование и исследование плазменных порошковых покрытий из оксидной керамики, модифицированной высокоэнергетическими воздействиями

Канд. техн. наук В. А. Оковитый¹⁾,
чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Ф. И. Пантелеенко¹⁾, В. В. Оковитый¹⁾,
чл.-кор. НАН Беларуси, докт. физ.-мат. наук, проф. В. М. Асташинский²⁾,
докт. физ.-мат. наук, проф. В. В. Углов³⁾,
кандидаты физ.-мат. наук В. И. Шиманский³⁾, Н. Н. Черенда³⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (Минск, Республика Беларусь),

³⁾Белорусский государственный университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. В статье приведены результаты исследования структуры и свойств оптимизированных по составу многослойных композиционных покрытий из материалов на основе диоксида циркония, используемого для напыления плазменных покрытий на модели элементов экранов противометеорной защиты. Рассмотрено влияние параметров плазменной струи (тока, дистанции напыления, расхода плазмообразующего газа азота) и фракционного состава исходного порошка на характеристики двухслойных композиционных покрытий на основе никель-хрома-алюминия-иттрия и диоксида циркония на элементах защитных экранов. Проведена оптимизация на основании получения максимального коэффициента использования порошка. В результате исследований установлены особенности элементного и фазового составов, морфологии поверхности, микроструктуры многослойных композиционных покрытий на основе твердого слоя оксидов металлов и вязкого переходного подслоя, подвергнутых воздействию компрессионных плазменных потоков. Исследования проводились с помощью растровой электронной микроскопии, энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа, рентгеноструктурного анализа. На основании полученных результатов показано, что воздействие компрессионных плазменных потоков на многослойные композиционные покрытия приводит к модифицированию приповерхностного слоя толщиной до 15 мкм, заключающемуся в его плавлении и последующей скоростной кристаллизации, которые в совокупности обеспечивают повышение его плотности, снижение пористости при сохранении исходного фазового состояния. Жидкофазные процессы в расплавленной фазе приповерхностного слоя позволяют модифицировать морфологические свойства поверхности, связанные с ее сглаживанием и снижением шероховатости.

Ключевые слова: плазменное напыление, материалы на основе оксидной керамики, диоксид циркония, оптимизация процесса, противометеорная защита, коэффициент использования порошка, прочность сцепления покрытия с основой, элементный состав, морфология, структура покрытия, модифицирование под воздействием компрессионных потоков

Для цитирования: Формирование и исследование плазменных порошковых покрытий из оксидной керамики, модифицированной высокоэнергетическими воздействиями / В. А. Оковитый [и др.] // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 5. С. 378–389. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-378-389>

Formation and Investigation of Plasma Powder Coatings Made of Oxide Ceramics Modified with High-Energy Effects

V. A. Okovity¹⁾, F. I. Panteleenko¹⁾, V. V. Okovity¹⁾, V. M. Astashinsky²⁾
V. V. Uglov³⁾, V. I. Chimanskiy³⁾, N. N. Cerenda³⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus (Minsk, Republic of Belarus),

³⁾Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper presents results of studying structure and properties of multilayer composite coatings optimized for their composition based on zirconium dioxide materials used for deposition of plasma coatings on the models of elements for

Адрес для переписки

Оковитый Вячеслав Александрович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-93-71
niil_svarka@bntu.by

Address for correspondence

Okovity Vjacheslav A.
Belarusian National Technical University
22 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-93-71
niil_svarka@bntu.by

anti-meteor shielding screens. The influence of plasma jet parameters (current, distance of sputtering, consumption of plasma-forming nitrogen gas) and fractional composition of an initial powder on characteristics of two-layer composite coatings based on nickel-chromium-aluminum-yttrium and zirconium dioxide on the elements of protective screens has been analyzed in the paper. Optimization has been carried out on the basis of obtaining maximum coefficient of powder utilization. The investigations have made it possible to ascertain specific features of elemental and phase composition, surface morphology, microstructure multilayer composite coatings on the basis of a solid layer of metal oxides and a viscous transition sub-layer subjected to compression plasma flows. The investigations have been executed with the help of scanning electron microscopy, energy dispersive x-ray spectral microanalysis, and x-ray diffraction analysis. It has been shown on the basis of the obtained results that the effect of compression plasma flows on multilayer composite coatings leads to a modification of a near-surface layer with a thickness up to 15 μm that presupposes its melting and subsequent high-speed crystallization which together provide an increase in its density, decrease in porosity while maintaining the initial phase state. Liquid-phase processes in the molten phase of the near-surface layer permit to modify morphological properties of the surface which are associated with its smoothing and lowering of roughness.

Keywords: plasma spraying, oxide ceramic materials, zirconium dioxide, process optimization, anti-meteor protection, powder use factor, coating adhesion to substrate, elemental composition, morphology, coating structure, modification under the action of compression flows

For citation: Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Uglov V. V., Chimanskiy V. I., Ceren-da N. N. (2018) Formation and Investigation of Plasma Powder Coatings Made of Oxide Ceramics Modified with High-Energy Effects. *Science and Technique*. 17 (5), 378–389. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-378-389> (in Russian)

Введение

Разработка и создание композиционных керамических материалов обусловлены необходимостью улучшения свойств плазменных покрытий для нанесения противометеорной защиты [1–3]. Широкое применение для нанесения керамических покрытий, в том числе из материалов на основе оксидной керамики, получил метод плазменного напыления (до 90 % разработок) [4–6]. Плазменный метод нанесения покрытий используется в современной технике для упрочнения и восстановления деталей. Таким методом наносятся покрытия из металлических проволок, порошковых материалов, керамики и композиционных материалов. Как правило, экономически наиболее целесообразно упрочнение-восстановление данным методом ответственных и дорогостоящих деталей. Плазменный метод является универсальным в связи с тем, что на одном оборудовании при соответствующих режимах можно производить напыление различных материалов и реализовывать целый ряд технологий. Возможно напыление большой номенклатуры деталей с минимальными затратами на технологическую оснастку [7].

Эффективность защиты объектов от повреждений при высокоэнергетическом воздействии определяется противоударной стойкостью используемых материалов. Применительно к противометеорной защите космических аппаратов высокопрочные материалы должны удовлетворять основным требованиям (минимальная плотность, высокие вязкопластичные свойства, твердость) [8]. Из общих физических

соображений следует, что эффективность защиты определяется уровнем поглощения кинетической энергии метеорных частиц материалом покрытия. Не касаясь всех механизмов поглощения энергии, отметим, что значительная ее часть расходуется на упругую и пластическую деформацию материала покрытий. Высокая пластичность и вязкость являются существенными факторами увеличения стойкости. Повышение твердости резко снижает пластичность и вязкость, приводит к хрупкому разрушению. Высокой противоударной стойкостью обладают многослойные структуры с твердым керамическим слоем на основе оксидов и подслоем из вязкого металлического материала.

При плазменном напылении оксидов один из наиболее распространенных дефектов – отслаивание покрытий. Причем этот дефект может проявляться непосредственно в процессе напыления и при эксплуатации покрытия [9]. Отслаивания вызваны, как правило, большой разницей в коэффициентах термического расширения оксидного покрытия и напыляемого изделия. Для частичного сглаживания температурного коэффициента линейного расширения применяют подслои [10]. При выборе материала подслоя необходимо стремиться также к образованию на границе раздела высокой адгезионной прочности [11]. Основная функция подслоя в плазменных покрытиях – пластическая релаксация напряжений, возникающих из-за несогласованного изменения объемов керамических и металлических материалов при нагреве и охлаждении покрытия. Так как пластичность сплавов катастрофически уменьшается

в результате их высокотемпературного окисления, а слой керамики является проницаемым для газов, материал подслоя должен обладать высокой жаростойкостью [12–14]. Поэтому проблема формирования подслоя сцепления сводится к решению двух основных задач:

- 1) обеспечению необходимой пластичности подслоя в рабочем интервале температур;
- 2) обеспечению жаростойкости подслоя.

Комплексное решение данных задач затруднено. Необходима жесткая оптимизация химического и фазового составов сплава. Учитывая вышеизложенное и актуальность проблемы, целью исследований явились оптимизация технологических режимов напыления многослойных композиционных плазменных покрытий на модели элементов экранов для противометеорной защиты космических аппаратов и изучение свойств покрытий после высокоэнергетической обработки.

Оптимизация процесса напыления вязкого металлического слоя на основе никель-хрома-алюминия-иттрия

Оптимизация напыления NiCrAlI выполнялась по методике, описанной в [15, 16]. На первом этапе проводилась оптимизация на основании получения максимального коэффициента использования порошка (КИП). Вначале КИП определяли при различных значениях тока (300–650 А, с интервалом 50 А) и расходах плазмообразующего газа R_{N_2} (45 и 50 л/мин), но с постоянной дистанцией напыления $L = 110$ мм (рис. 1).

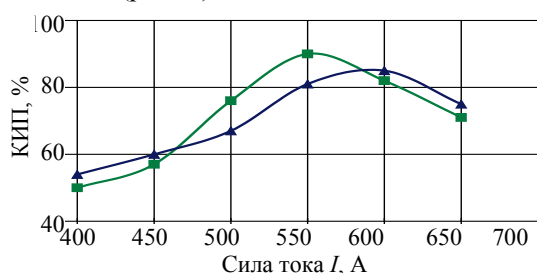


Рис. 1. Зависимость коэффициента использования порошка от силы тока электрической дуги, для порошков NiCrAlI с различными расходами плазмообразующего газа R_{N_2} , л/мин: 1 – 50; 2 – 45 ($L = 110$ мм, $R_{\text{пор}} = 4,5$ кг/ч, фракция порошка 40–63 мкм)

Fig. 1. Dependence of powder use factor on current intensity of electric arc for NiCrAlI powders with various flow rate of plasma-forming gas R_{N_2} , l/min: 1 – 50; 2 – 45 ($L = 110$ mm, $R_{\text{pore}} = 4.5$ kg/h, powder fraction 40–63 μm)

На следующем этапе оптимальные значения дистанции напыления определялись с постоянными значениями тока и величины расхода плазмообразующего газа ($I = 550$ А; $R_{N_2} = 50$ л/мин) для различных фракций порошка (рис. 2).

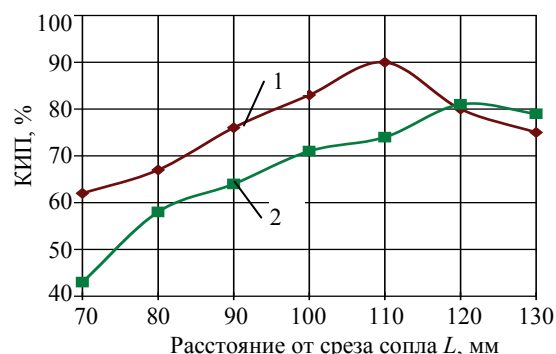


Рис. 2. Зависимость коэффициента использования порошка от дистанции напыления для порошков NiCrAlI с фракцией, мкм: 1 – 40–63; 2 – 63–100 ($I = 550$ А, $R_{N_2} = 50$ л/мин, $R_{\text{пор}} = 4,5$ кг/ч)

Fig. 2. Dependence of powder use factor on sputtering distance for NiCrAlI powders with fraction of, μm : 1 – 40–63; 2 – 63–100 ($I = 550$ А, $R_{N_2} = 50$ l/min, $R_{\text{pore}} = 4.5$ kg/h)

Увеличение тока и расхода плазмообразующего газа (рис. 1) до определенных значений приводит к росту КИП, так как эти параметры влияют на степень проплавления порошка [16]. Дальнейшее их увеличение ведет к тому, что частицы перегреваются и при ударе о подложку разбрызгиваются, следовательно, КИП уменьшается. При увеличении расхода N_2 происходит уменьшение значений тока для максимального КИП. Для $R_{N_2} = 50$ л/мин максимальный КИП = 90 % соответствует $I = 550$ А, для $R_{N_2} = 45$ л/мин максимальный КИП = 85 % соответствует $I = 600$ А. Похожая тенденция сохраняется и при изменении дистанции напыления (рис. 2) при оптимизации значения расхода N_2 и тока (в рассматриваемом случае $R_{N_2} = 50$ л/мин, $I = 550$ А). При малых дистанциях напыления частица не успевает достаточно нагреться и достигает подложки с температурой $< t_{\text{пл}}$. В рассматриваемом случае возрастание КИП происходит до $L = 110$ мм, дальнейшее увеличение дистанции напыления приводит к тому, что частица из-за длительного нахождения в струе переплавляется и при ударе о подложку разбрызгивается, соответственно КИП падает [17].

На оптимальных режимах для NiCrAlI (расход плазмообразующего газа азота 50 л/мин, ток 550 А, дистанция напыления 110 мм, фракция порошка 40–63 мкм, расход порошка 4,5 кг/ч) получены покрытия с КИП = 91 %.

Сравнительный анализ зависимости КИП NiCr, NiAl и NiCrAlI от дистанции напыления, приведенный на рис. 3, показывает, что при аналогичном характере кривых представленных зависимостей по абсолютной величине значения КИП больше при оптимальных режимах для порошка NiCrAlI, что можно объяснить более высокой пластичностью и адгезионной прочностью данного сплава.

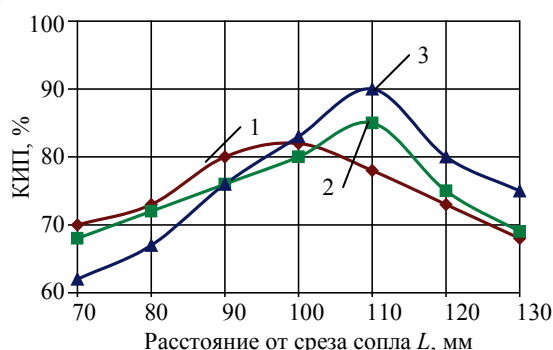


Рис. 3. Зависимость коэффициента использования порошка от дистанции напыления для порошков NiAl (1), NiCr (2) и NiCrAlI (3) с фракцией 40–63 мкм и расходом порошка 4,5 кг/ч: NiAl – расход плазмообразующего газа азота 45 л/мин, ток 500 А; NiCr и NiCrAlI – расход плазмообразующего газа азота 50 л/мин, ток 550 А

Fig. 3. Dependence of powder use factor on sputtering distance for powders NiAl (1), NiCr (2) and NiCrAlI (3) with fraction of 40–63 μm and powder consumption of 4.5 kg/h: NiAl – flow rate of the plasma-forming nitrogen gas 45 l/min, current 500 A; NiCr and NiCrAlI – flow rate of plasma-forming nitrogen gas 50 l/min, current 550 A

Оптимизация процесса нанесения антиметеоритного покрытия на основе диоксида циркония

В процессе плазменного напыления действует большое число факторов, оказывающих влияние на свойства получаемых покрытий. Важнейшие из них при прочих равных условиях – расход плазмообразующего и транспортирующего газов, расход распыляемого порошка, ток электрической дуги (подводимая мощность), дистанция напыления, скорость перемещения подложки [17]. В качестве примера

на рис. 4–8 представлен характер зависимостей эффективности плазменного напыления твердого комбинированного слоя на основе диоксида циркония на подложку из никель-хрома, характеризовать которые можно с помощью КИП от перечисленных условий напыления. Зависимость КИП от дистанции напыления показана на рис. 4. При малых дистанциях напыления частица не успевает достаточно нагреться и достигает подложки с температурой $< t_{\text{пл}}$.

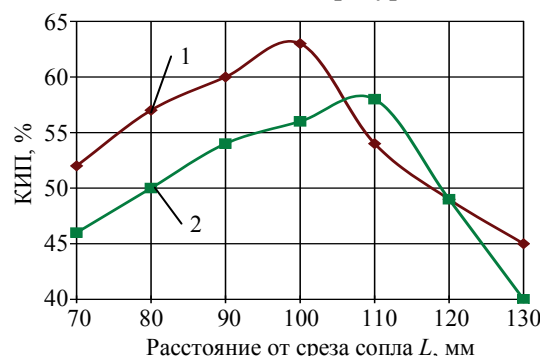


Рис. 4. Зависимость коэффициента использования порошка от дистанции напыления для порошков ZrO_2 с фракцией: 1 – $<50 \mu\text{m}$; 2 – $50\text{--}63 \mu\text{m}$ ($I = 500 \text{ A}$, $R_{\text{N}_2} = 50 \text{ л/мин}$, $R_{\text{пор}} = 4,5 \text{ кг/ч}$)

Fig. 4. Dependence of powder use factor on sputtering distance for ZrO_2 powders with fraction: 1 – $<50 \mu\text{m}$; 2 – $50\text{--}63 \mu\text{m}$ ($I = 500 \text{ A}$, $R_{\text{N}_2} = 50 \text{ л/мин}$, $R_{\text{pore}} = 4.5 \text{ kg/h}$)

В рассматриваемом случае возрастание КИП происходит до $L = 100 \text{ мм}$ для порошков ZrO_2 с фракцией $<50 \mu\text{m}$ и до $L = 110 \text{ мм}$ – с фракцией $50\text{--}63 \mu\text{m}$, дальнейшее увеличение дистанции напыления приводит к тому, что частица из-за длительного нахождения в струе переплавляется и при ударе о подложку разбрызгивается, соответственно КИП падает.

Увеличение тока и расхода плазмообразующего газа (рис. 5, 6) до определенных значений приводит к росту КИП, так как эти параметры влияют на степень проплавления порошка. Дальнейшее их увеличение ведет к тому, что частицы перегреваются и при ударе о подложку разбрызгиваются, следовательно, КИП уменьшается. При повышении расхода N_2 происходит уменьшение значений тока для максимального КИП. Для $R_{\text{N}_2} = 55 \text{ л/мин}$ максимальный КИП, равный 66 %, соответствует $I = 600 \text{ A}$, для $R_{\text{N}_2} = 50 \text{ л/мин}$ максимальный КИП, равный 62 %, соответствует $I = 650 \text{ A}$.

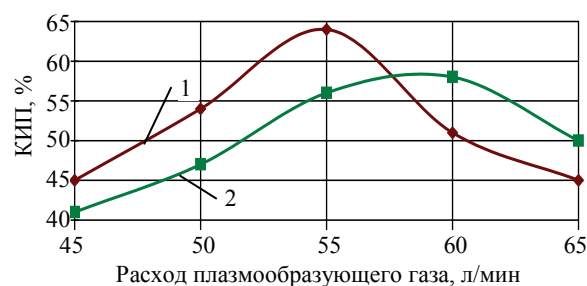


Рис. 5. Зависимость коэффициента использования порошка от расхода плазмообразующего газа N_2 для порошков ZrO_2 с фракцией: 1 – <50 мкм; 2 – 50–63 мкм ($L = 100$ мм; $I = 500$ А; $R_{пор} = 4,5$ кг/ч)

Fig. 5. Dependence of powder use factor on flow rate of plasma-forming gas N_2 for ZrO_2 powders with a fraction: 1 – <50 μm ; 2 – 50–63 μm ($L = 100$ mm, $I = 500$ A, $R_{pore} = 4.5$ kg/h)

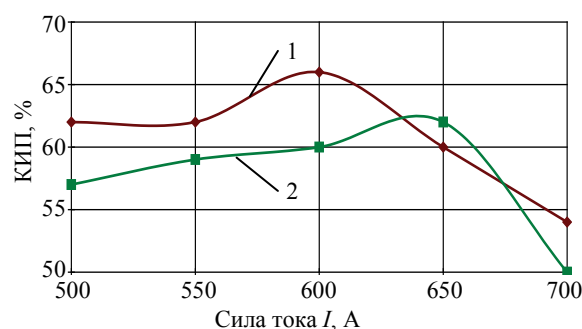


Рис. 6. Зависимость коэффициента использования порошка от силы тока электрической дуги для порошков ZrO_2 с расходом плазмообразующего газа N_2 : 1 – $R_{N_2} = 55$ л/мин; 2 – $R_{N_2} = 50$ л/мин ($L = 100$ мм, $R_{пор} = 4,5$ кг/ч, с фракцией <50 мкм)

Fig. 6. Dependence powder use factor on current intensity of electric arc for ZrO_2 powders with flow rate of plasma-forming gas N_2 : 1 – $R_{N_2} = 55$ l/min; 2 – $R_{N_2} = 50$ l/min; ($L = 100$ mm, $R_{pore} = 4.5$ kg/h, with a fraction <50 μm)

Для различных фракций порошка ZrO_2 (<50 мкм, 50–63 мкм) при разных токах дуги I (400 А, 500 А, 600 А, 700 А) было измерено процентное содержание фаз в порошке. При увеличении размера фракции с <50 до 50–63 мкм в покрытии уменьшится количество тетрагональной фазы (Т) (рис. 7), приводящее к ухудшению ударной вязкости.

Влияние расхода подачи порошка на КИП показано на рис. 8. Так как в формировании покрытия принимают участие все частицы в плазменной струе, наилучшими свойствами будут обладать покрытия, отвечающие плазменным

режимам, где доля расплавленных частиц в струе и их концентрация максимальны.

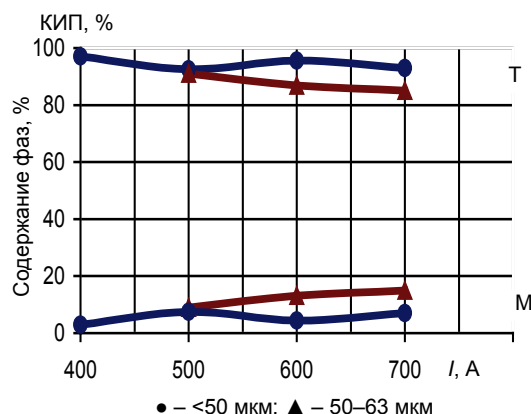


Рис. 7. Влияние тока и размеров частиц порошка на фазовый состав при напылении покрытий на основе ZrO_2 ($R_{N_2} = 55$ л/мин, $L = 110$ мм, $R_{пор} = 2$ кг/ч)

Fig. 7. Influence of current and size of powder particles on phase composition while spraying coatings on the basis of ZrO_2 ($R_{N_2} = 55$ l/min, $L = 110$ mm, $R_{pore} = 2$ kg/h)

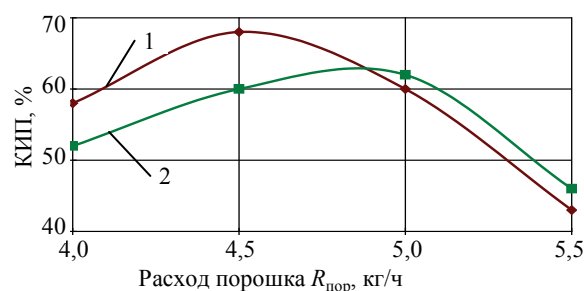


Рис. 8. Зависимость коэффициента использования порошка от его расхода для порошков ZrO_2 с фракцией: 1 – <50 мкм; 2 – 50–63 мкм ($L = 100$ мм; $I = 600$ А; $R_{N_2} = 55$ л/мин)

Fig. 8. Dependence of powder use factor on powder consumption for ZrO_2 powders with fraction: 1 – <50 μm ; 2 – 50–63 μm ($L = 100$ mm, $I = 600$ A, $R_{N_2} = 55$ l/min)

Для определенных выше оптимальных режимов максимальный КИП соответствует расходу порошка 4,5 кг/ч, при дальнейшем увеличении расхода КИП уменьшается, поскольку тепловой энергии плазменной струи не хватает для расплавления всех подаваемых в струю частиц. С увеличением степени охлаждения при одинаковых скоростях подачи порошка КИП уменьшается. В результате проведенной оптимизации отработаны режимы напыления APS (плазменное напыление на воздухе) процесса

для материалов ZrO_2 . Оптимизация параметров напыления проводилась на основании получения максимального коэффициента использования материала. На оптимальных режимах для ZrO_2 (расход плазмообразующего газа азота 55 л/мин, ток 600 А, дистанция напыления 100 мм, фракция порошка <50 мкм, расход порошка 4,5 кг/ч) получены покрытия с КИП = 68 %.

Исследование элементного состава и морфологии модифицированных под воздействием компрессионных плазменных потоков оптимизированных многослойных композиционных покрытий

Элементный состав двухслойных композиционных покрытий на основе диоксида циркония ZrO_2 исследовался с помощью энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа с использованием микроанализатора Oxford Instruments X-Max^N, работающего совместно с растровым электронным микроскопом LEO 1455 VP. Элементный состав сформированных покрытий до воздействия компрессионных плазменных потоков приведен в табл. 1.

Таблица 1

Элементный состав покрытий в исходном состоянии (до воздействия компрессионных плазменных потоков)

Elemental composition of coatings in initial state (before exposure to compression plasma streams)

Элемент	Концентрация, %	
	весовых долей	атомных долей
O	31,5	71,4
Zr	52,2	21,5
Y	16,3	7,1
Сумма	100,0	100,0

Анализ элементного состава проводился от поверхности с использованием спектров характеристического рентгеновского излучения, зарегистрированного от слоя толщиной около 1–2 мкм. Согласно представленным данным, в приповерхностном слое содержится 21,5 % атомных долей (52,2 % весовых долей) циркония и 71,4 % атомных долей (31,5 % весовых долей) кислорода, что близко к стехиометрическому составу ZrO_2 с избытком кислорода. Также в приповерхностном слое покрытия обнаружено присутствие иттрия с концентрацией 7,1 % атомных долей (16,3 % весовых до-

лей), наличие которого может являться результатом присутствия технологической примеси для стабилизации кубической фазы оксида циркония. Исследование методом растровой электронной микроскопии позволило выявить особенности распределения элементов по поверхности покрытий, а также особенности морфологии поверхности.

Из РЭМ-изображений, представленных на рис. 9 и полученных в режиме регистрации отраженных электронов и указывающих на характер распределения элементов в приповерхностном слое, видно, что покрытия характеризуются равномерным распределением обнаруженных элементов по поверхности.

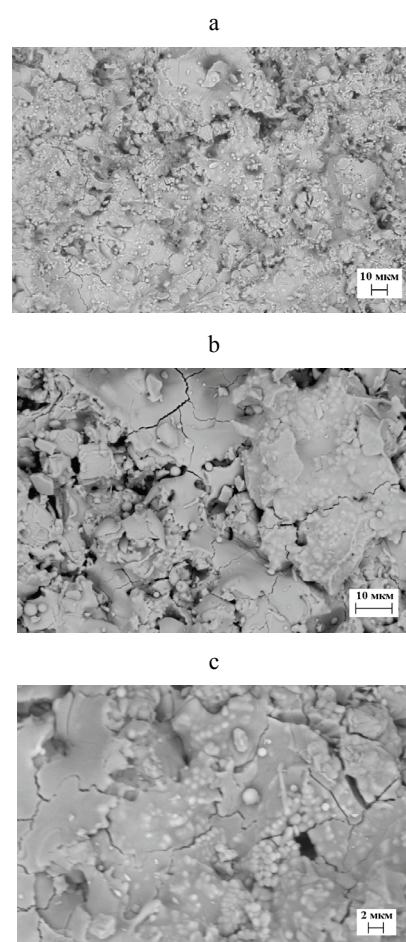


Рис. 9. Растровое электронно-микроскопическое изображение участков поверхности покрытий до воздействия компрессионных плазменных потоков: а – $\times 1000$; б – $\times 2500$; в – $\times 5000$

Fig. 9. Raster electron microscopic images of coating surface areas before exposure to compression plasma streams: а – $\times 1000$; б – $\times 2500$; в – $\times 5000$

Более детальное исследование поверхности в режиме регистрации вторичных электронов позволило обнаружить, что структура покрытий представляет собой спеченные частицы размером несколько микрометров с характерным частичным проплавлением по краям вследствие термических процессов, происходящих при формировании покрытий. Кроме того, на поверхности покрытия удалось зафиксировать наличие мелких частиц со средним размером менее 1 мкм. В покрытии также обнаружены поры (размером несколько микрометров) между отдельными частицами и микротрещины в переплавленных областях.

Сформированные покрытия на основе диоксида циркония подвергались воздействию компрессионных плазменных потоков. Результаты рентгеноспектрального микроанализа, проведенного с поверхности покрытий после воздействия компрессионных плазменных потоков, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Элементный состав покрытий после воздействия компрессионными плазменными потоками

Elemental composition of coatings after exposure to compression plasma stream

Элемент	Концентрация, %	
	весовых долей	атомных долей
O	21,8	56,1
Zr	57,0	27,3
Y	18,8	9,3
N	2,4	7,3
Сумма	100,0	100,0

Согласно полученным данным, в приповерхностном слое содержится 27,3 % атомных долей (57,0 % весовых долей) циркония и 56,1 % атомных долей (21,8 % весовых долей) кислорода. Как и в исходном состоянии, в покрытии после воздействия компрессионной плазмы обнаружено присутствие атомов иттрия с концентрацией 9,3 % атомных долей (18,8 % весовых долей). Помимо этого, в приповерхностном слое покрытия после воздействия компрессионных плазменных потоков удалось выявить наличие 2,4 % весовых долей (7,3 % атомных долей) азота, присутствие которого обусловлено проникновением плазмообразующего вещества в приповерхностный слой. Изменение со-

отношения элементов после воздействия компрессионной плазмы, по-видимому, обусловлено частичным испарением кислорода, концентрация которого снижается.

РЭМ-изображения морфологии поверхности покрытий после воздействия компрессионных плазменных потоков приведены на рис. 10. На представленных изображениях можно видеть характерный рельеф поверхности, свойственный переплавленному и закристаллизовавшемуся поверхностному слою. Таким образом, после воздействия компрессионной плазмы происходят плавление и последующая кристаллизация поверхности. Также на поверхности обнаружено присутствие разветвленной сетки микротрещин, ограничивающих области размером от 20 до 80 мкм. Появление таких трещин связано с действием термоупругих напряжений в приповерхностном слое, вызванных скоростной кристаллизацией расплава. Результатом скоростной кристаллизации расплава после воздействия компрессионной плазмы является формирование мелкоячеистой субструктуры со средним размером ячеек 200–400 нм, обнаруженных при детальном анализе поверхности.

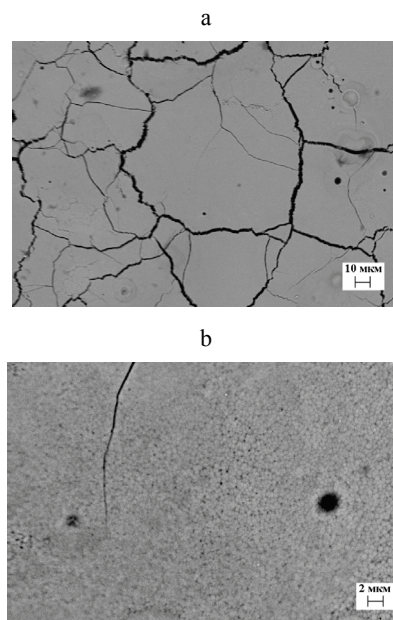


Рис. 10. Растровое электронно-микроскопическое изображения участков поверхности покрытий после воздействия компрессионных плазменных потоков при различных увеличениях: а – $\times 1000$; б – $\times 5000$

Fig. 10. Raster electron microscopic images of coating surface areas after exposure to compression plasma streams at various magnifications: а – $\times 1000$; б – $\times 5000$

Анализ распределения характеристического рентгеновского излучения по поверхности покрытий, обработанных компрессионной плазмой, результаты которого приведены на рис. 11, свидетельствует о неравномерном распределении по поверхности элементов покрытия – циркония, кислорода и иттрия, что является результатом регистрации отраженных электронов от поверхности с сильно развитым рельефом (с присутствием микротрещин, поверхностных частиц). При этом следует отметить, что характер распределения элементов после воздействия плазмы становится равномерным ввиду снижения шероховатости поверхности после кристаллизации.

Результаты исследования микроструктуры поперечных сечений сформированных покрытий, проведенные с использованием растровой элект-

ронной микроскопии, представлены на рис. 12. Из приведенных данных видно, что толщина покрытия ZrO_2 составляет около 600 мкм.

Между покрытием на основе диоксида циркония ZrO_2 на РЭМ-изображении обнаружено наличие промежуточного подслоя, толщина и элементный состав которого были исследованы с помощью рентгеноспектрального микроанализа. Результаты, представленные на рис. 13, указывают на то, что толщина подслоя составляет около 60 мкм. Элементный анализ позволил установить, что подслоем состоит из никеля, хрома, алюминия и иттрия (рис. 13, 14), а также сопутствующих примесей марганца, меди и кремния. При этом следует отметить равномерное распределение указанных элементов вдоль всей толщины подслоя.

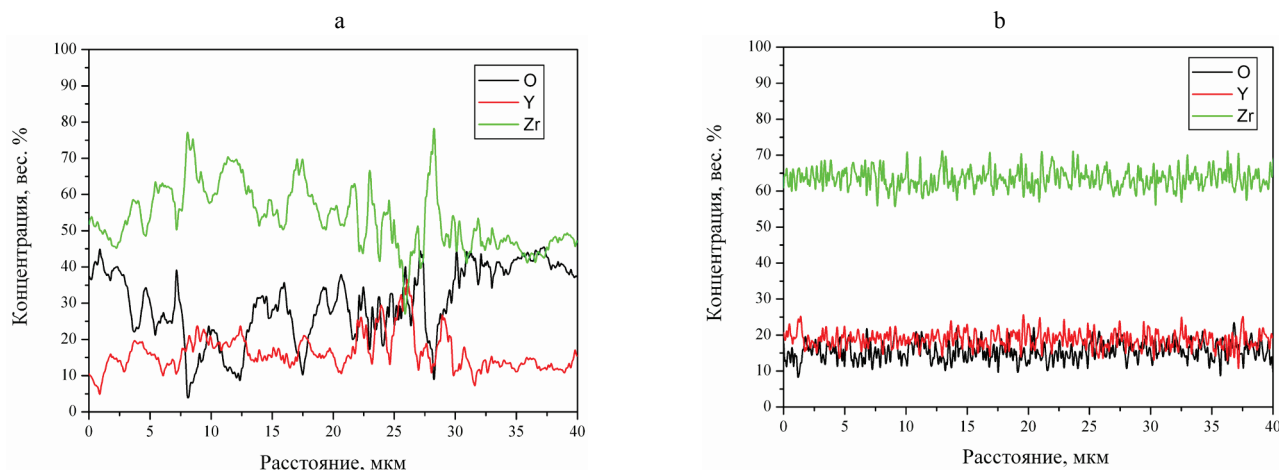


Рис. 11. Распределения характеристического рентгеновского излучения элементов вдоль поверхности:
а – исходное покрытие; б – после воздействия компрессионной плазмы

Fig. 11. Distributions of characteristic X-ray radiation of elements along surface:
a – original coating; b – after impact of compression plasma

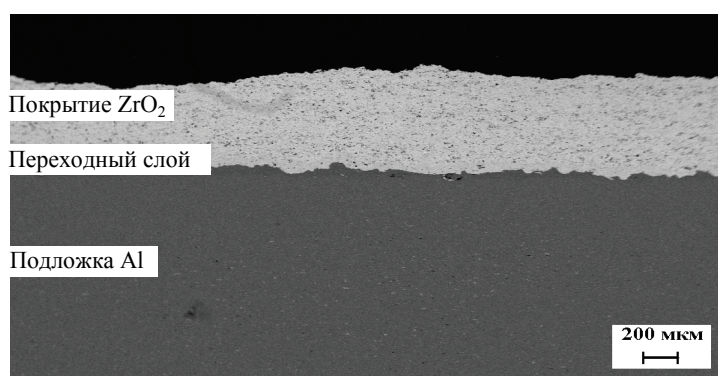


Рис. 12. Растровое электронно-микроскопическое изображение поперечного сечения покрытия до воздействия компрессионными плазменными потоками

Fig. 12. Raster electron microscopic image of coating cross-section before exposure to compression plasma streams

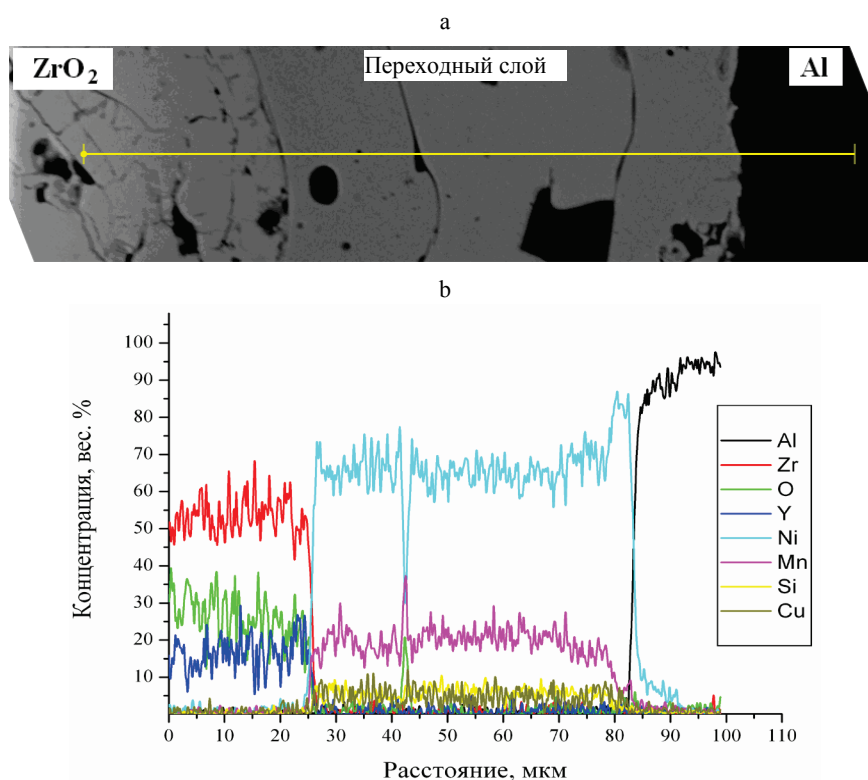


Рис. 13. Растровое электронно-микроскопическое изображение (а) и распределение характеристического рентгеновского излучения элементов (b) вдоль выделенной линии на поперечном шлифе покрытия

Fig. 13. Raster electron microscopic image (a) and distribution of characteristic X-ray radiation of elements (b) along dedicated line on coating cross-section

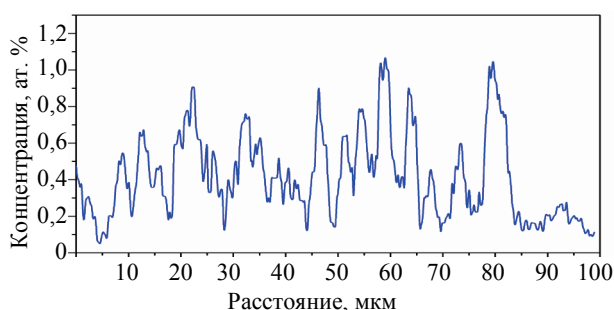


Рис. 14. Распределение хрома по толщине промежуточного слоя

Fig. 14. Distribution of chromium along thickness of intermediate layer

РЭМ-изображения микроstructures поперечных сечений покрытия ZrO_2 и промежуточного слоя представлены на рис. 15. Из приведенных данных видно, что в исходном состоянии покрытие характеризуется пористостью, причем средний размер пор составляет несколько микрометров. Микроstructure промежуточного слоя также характеризуется пористостью, однако в данном случае преобладают узкие несплошности структуры.

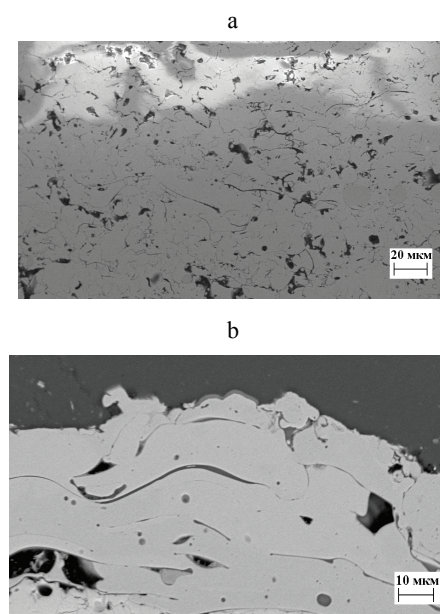


Рис. 15. Растровое электронно-микроскопическое изображение микроstructure покрытия на поперечном шлифе: а – оксид циркония; б – промежуточный слой

Fig. 15. Raster electron microscopic image of coating microstructure on transverse section: а – zirconium oxide; б – intermediate layer

РЭМ-изображение поверхностного слоя покрытий, полученное на поперечном шлифе до воздействия компрессионных плазменных потоков, показано на рис. 16. Из приведенных данных видно, что в исходном состоянии приповерхностный слой характеризуется наличием большого количества микротрещин, распространяющихся как вдоль поверхности, так и в глубину. После воздействия на покрытие компрессионных плазменных потоков происходит сглаживание поверхности, о чем свидетельствует РЭМ-изображение поперечного шлифа, представленное на рис. 17.

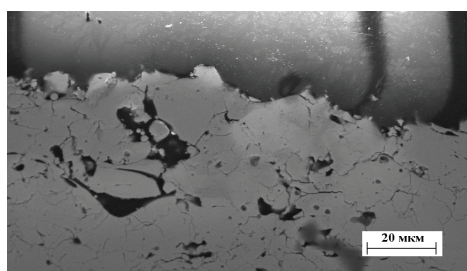


Рис. 16. Растровое электронно-микроскопическое изображение поверхностного слоя покрытия до воздействия компрессионными плазменными потоками (поперечный шлиф)

Fig. 16. Raster electron microscopic image of coating surface layer before exposure to compression plasma streams (cross section)

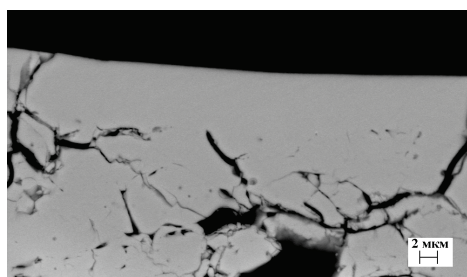


Рис. 17. Растровое электронно-микроскопическое изображение поперечного шлифа покрытия после воздействия компрессионными плазменными потоками

Fig. 17. Raster electron microscopic image of coating cross-section after exposure to compression plasma streams

Анализ полученных РЭМ-изображений показал, что в приповерхностном модифицированном слое покрытий существенным образом снижается количество микротрещин и пор, что может быть следствием плавления приповерх-

ностного слоя и последующей его кристаллизации из расплава. Тем не менее некоторое количество микротрещин присутствует вследствие скоростного охлаждения закристаллизовавшегося слоя. Однако данные микротрещины распространяются преимущественно в глубину покрытия, что может препятствовать отслоению частей покрытий в процессе механического воздействия. Толщина переплавленного слоя составляет 8–10 мкм.

ВЫВОДЫ

1. Оптимизация параметров напыления антиметеоритных покрытий на основе диоксида циркония проводилась путем получения максимального коэффициента использования материала и максимального содержания тетрагональной фазы в напыленном покрытии.

2. Проведены исследования влияния параметров плазменной струи (ток, дистанция напыления, расход плазмообразующего газа азота), фракционного состава исходного порошка на характеристики антиметеоритных покрытий.

3. На оптимальных режимах (ток дуги 600 А; дистанция напыления 100 мм; расход плазмообразующего газа азота 55 л/мин; фракционный состав порошка оксида циркония <50 мкм; расход сжатого воздуха для охлаждения 1 м³/мин; $p = 4$ атм, расход порошка 4,5 кг/ч) получаем антиметеоритные покрытия на основе диоксида циркония с коэффициентом использования материала 68 %; содержание тетрагональной фазы 96 %. Разработаны технологические принципы формирования двухслойных композиционных покрытий – вязкий металлический слой никель-хром-алюминий-иттрий и твердый комбинированный слой диоксид циркония.

4. Использование сплавов на основе никеля-алюминия-хрома-иттрия в качестве вязкого металлического слоя для напыления композиционных многослойных покрытий значительно улучшило эксплуатационные характеристики моделей элементов экранов противометеорной защиты по сравнению с использованием никель-хрома и никель-алюминия: прочность сцепления возрастает в 1,3–1,5 раза и максимальный КИП увеличивается с 58 до 68 %.

4. В результате проведенных исследований установлены особенности элементного и фазового составов, морфологии поверхности, микроструктуры, а также механических свойств многослойных композиционных покрытий на основе твердого слоя оксидов металлов и вязкого переходного подслоя, подвергнутых воздействию компрессионных плазменных потоков. Исследования проводились с помощью растровой электронной микроскопии, энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа, рентгеноструктурного анализа и трибологических испытаний.

5. На основании полученных результатов показано, что воздействие компрессионных плазменных потоков на многослойные композиционные покрытия приводит к модифицированию приповерхностного слоя толщиной до 15 мкм, заключающемуся в его плавлении и последующей скоростной кристаллизации, которые в совокупности обеспечивают повышение его плотности, снижение пористости при сохранении исходного фазового состояния. Жидкофазные процессы в расплавленной фазе приповерхностного слоя позволяют модифицировать морфологические свойства поверхности, связанные с ее сглаживанием и снижением шероховатости.

6. Происходящие структурные изменения в приповерхностных слоях многослойных композиционных покрытий обеспечивают модифицирование их механических свойств, в частности трибологических параметров, проявляющихся в снижении коэффициента трения и позволяющих повысить износостойкость покрытий. Изучение закономерностей эволюции элементного состава, фазового состояния, микроструктуры модифицированных компрессионными плазменными потоками слоев показало оптимальное использование для элементов экранов для противометеорной защиты композиционных покрытий на основе диоксида циркония ZrO_2 с переходным вязким слоем на основе $Ni-Cr-Al-Y$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нанесение покрытий плазмой / В. В. Кудинов [и др.]. М.: Наука, 1990. 244 с.
2. Теплозащитные покрытия на основе ZrO_2 / А. Ф. Ильюшенко [и др.]. Минск: Ремика, 1998. 128 с.
3. Газотермические покрытия / В. Н. Анциферов [и др.]. Екатеринбург: Наука: Урал. издат. фирма, 1994. 324 с.
4. Акишин, А. И. Космическое материаловедение / А. И. Акишин. М.: НИИЯФ МГУ, 2007. С. 209.
5. Газотермическое напыление композиционных порошков / А. Я. Кулик [и др.]. М., 1985. 261 с.
6. Akishin, A. I. Effects of Space Conditions on Materials / A. I. Akishin, N.-Y.: Nova Science Publ., 2001. 199 p.
7. Safai, S. Plasma Sprayed Coating – their Ultramicrostructure / S. Safai, H. Herman // Advances in Surface Coating Technology. Paper 5 International Conference, London, 13–15 Feb., 1978. London: Pub. Welding Institute, 1978. P. 1–14.
8. Pulverfoermige Keramische Werkstoffe zum Plasmaspritzen / H. Eschnauer [et al.] // Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft. 1980. Vol. 57, № 4–5. P. 94–98.
9. McClocklin, R. S. Thermal-Spray Coatings for Computer Components / R. S. McClocklin, B. A. Teal // Journal of Vacuum Science Technology. 1975. Vol. 12, № 4. P. 784–785. <https://doi.org/10.1116/1.568671>.
10. Девойно, О. Г. Плазменные теплозащитные покрытия на основе диоксида циркония с повышенной термостойкостью / О. Г. Девойно, В. В. Оковитый // Наука и техника. 2015. № 1. С. 35–39.
11. Разработка технологии нанесения плазменных композиционных покрытий на основе диоксида циркония для систем космических аппаратов / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Наука и техника. 2015. № 3. С. 3–9.
12. Оковитый, В. В. Выбор оксидов для стабилизации диоксида циркония при получении теплозащитных покрытий аппаратов / В. В. Оковитый // Наука и техника. 2015. № 5. С. 26–32.
13. Технологические особенности формирования теплозащитных покрытий на основе диоксида циркония / В. В. Оковитый [и др.] // Наука и техника. 2016. Т. 15, № 3. С. 193–199. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-3-193-199>.
14. Формирование и исследование многослойных композиционных плазменных оксидных покрытий на элементах экранной противометеорной защиты / В. А. Оковитый [и др.] // Наука и техника. 2016. Т. 15, № 5. С. 357–364. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-5-357-364>.
15. Оптимизация процесса напыления керамических плазменных покрытий на модели элементов экранов противометеорной защиты / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Машиностроение и техносфера XXI в.: тез. Междунар. науч.-техн. конф., 15–20 сент. 2014 г., г. Севастополь. Донецк, 2014. Т. 2. С. 123–127.
16. Пантелеенко, Ф. И. Исследование плазменных двухслойных композиционных покрытий диоксид циркония – нихром / Ф. И. Пантелеенко, В. А. Оковитый, Е. Ф. Пантелеенко // Актуальные проблемы в машиностроении. 2017. Т. 4, № 3. С. 100–105.
17. Многослойные композиционные плазменные покрытия на элементах экранной защиты на основе диоксида циркония / В. А. Оковитый [и др.] // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 5. С. 422–431. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-422-431>.

Поступила 04.12.2017

Подписана в печать 26.02.2018

Опубликована онлайн 28.09.2018

REFERENCES

1. Kudinov V. V., Pekshev P. Yu., Belashchenko V. E., Kovalenko L. V. (1990) *Application of Plasma Coatings*. Moscow, Nauka Publ. 244 (in Russian).
2. Il'yushchenko A. F., Ivashko V. S., Okovityi V. A., Sobolevskii S. B. (1998) *Thermal Protective Coatings Based on ZrO_2* . Minsk, Remika Publ. 128 (in Russian).
3. Antsiferov V. N., Shmakov A. M., Ageev S. S., Bulanov V. Ya. (1994) *Gas-Thermal Coatings*. Ekaterinburg, Nauka: Ural Publishing Company. 324 (in Russian).
4. Akishin A. I. (2007) *Space Materials Science*. Moscow, Skobel'syn Institute of Nuclear Physics of Moscow State University. 209 (in Russian).
5. Kulik A. Ya., Borisov Yu. S., Mnukhin A. S., Nikitin M. D. (1985) *Gas-Thermal Spraying of Composite Powders*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 261.
6. Akishin A. I. (2001) *Effects of Space Conditions on Materials*. N.-Y., Nova Science Publ. 199.
7. Safai S., Herman H. (1978) Plasma Sprayed Coating – their Ultramicrostructure. *Advances in Surface Coating Technology. Paper 5 International Conference*. London: Pub. Welding Institute, 1–14.
8. Eschnauer H., Kilp F., Mundinger K., Kuehn H., Stitz O. (1980) Pulverfoermige Keramische Werkstoffe Zum Plasmaspritzen [Ceramic Powers for Plasma Spraying]. *Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft*, 57 (4–5), 94–98 (in German).
9. McClocklin R. S., Teal B. A. (1975) Thermal Spray Coatings for Computer Components. *Journal of Vacuum Science Technology*, 12 (4), 784–785. <https://doi.org/10.1116/1.568671>.
10. Devoino O. G., Okovity V. V. (2015) Plasma Thermal Barrier Coatings Based on Zirconium Dioxide with High Thermal Stability. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (1), 35–39 (in Russian).
11. Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Astashinsky V. M., Okovity V. V., Sobolewski S. B. (2015) Development of Technology for Application of Plasma Composite Coatings Based on Zirconium Dioxide for Spacecraft Systems. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (3), 3–9 (in Russian).
12. Okovity V. V. (2015) Selection of Oxides for Stabilization of Zirconium Dioxide while Obtaining Thermal Barrier Coatings. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (5), 26–32 (in Russian).
13. Okovity V. V., Devoino O. G., Okovity V. A., Astashinsky V. M. (2016) Technological Peculiarities of Thermal Barrier Coatings Based on Zirconium Dioxide. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 15 (3), 193–199 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-3-193-199>.
14. Okovity V. A., Panteleenko F. I., Devoino O. G., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Hramtsov P. P., Chernik M. Y., Uglov V. V., Sobolevsky S. B. Formation and Research of Multi-Layer Composite Plasma Oxide Coatings Based on Elements of Screen Meteoroid Protection. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 15 (5), 357–364 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-5-357-364>.
15. Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Astashinskii V. A. (2014) Optimization of Process Pertaining to Deposition of Ceramic Plasma Coatings on Model of Anti-Meteor Protection Screen Elements. *Mashinostroenie i Tekhnosfera XXI Veka: Tezisy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., 15–20 sent. 2014 g., g. Sevastopol'. T. 2* [Mechanical Engineering and Technosphere of the 21st Century: Abstracts of International Scientific and Technical Conference, September 15–20, 2014, Sevastopol. Vol. 2]. Donetsk, 23–127 (in Russian).
16. Panteleenko F. I., Okovity V. A., Panteleenko E. F. (2017) Investigation of Plasma Two-Layer Composite Coatings of Zirconia-Nichrome. *Aktual'nye Problemy v Mashinostroenii = Actual Problems in Machine Building*, 4 (3), 100–105 (in Russian).
17. Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. V., Hramtsov P. P., Chernik M. Y., Uglov V. V., Chimanskiy V. I., Cerenda N. N., Sobolewski S. B. (2017) Multilayer Composite Plasma Coatings on Screen Protection Elements Based on Zirconium Dioxide. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 16 (5), 422–431 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-422-431>.

Received: 04.12.2017

Accepted: 26.02.2018

Published online: 28.09.2018

Исследование влияния наладочных параметров станка на производительность и качество процесса одновременной двусторонней обработки линз

Докт. техн. наук, проф. А. С. Козерук¹⁾, асп. Д. Л. Мальпика^{1,2)}, инж. А. А. Сухоцкий¹⁾, кандидаты техн. наук, доценты М. И. Филонова¹⁾, В. О. Кузнецик¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Университет Якамбу (Баркисимето, Венесуэла)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Приведена методика нахождения рациональных режимов абразивной обработки высокоточных линз по методу свободного притирания на финишных операциях. Получены аналитические выражения для определения координат опорных точек на сферической поверхности, необходимые для математического моделирования процесса ее обработки на рычажных станках. Изложены результаты теоретической оценки качества формообразования высокоточных исполнительных поверхностей линз в случае различных комбинаций наладочных параметров технологического оборудования. При этом выявлены как наиболее рациональные, так и неблагоприятные режимы обработки. В частности, к последнему случаю относится формообразование посредством изменения частот вращений входного звена исполнительного механизма станка ω_2 и линзы ω_d . Характерным здесь является то, что при максимальном значении ω_d получается низкое качество обработки на всем интервале изменения ω_2 , и особенно в случае, когда эти частоты равны. Установлено, что наивысшая точность обработки достигается при максимальных амплитуде колебательного движения инструмента, его диаметре и частоте вращения детали и минимальной частоте вращения входного звена исполнительного механизма станка. А поскольку такие наладочные параметры приводят к усиленному съему припуска в краевой зоне заготовки, при обработке выпуклой поверхности линзы ее радиус кривизны на каждой предшествующей операции должен быть больше по сравнению с радиусом кривизны, который необходимо получить на последующих операциях. Для вогнутой поверхности должна соблюдаться обратная закономерность значений радиуса кривизны. Предложены наиболее выгодные наладочные параметры станка различных комбинаций для устранения погрешностей (в виде общих как «бугра», так и «ям») с учетом производительности и точности обработки. Определено влияние величины биения шпинделя станка на точность обработки линз широкого диапазона диаметров.

Ключевые слова: абразивная обработка, станок, линзы, математическое моделирование, формообразование, высокоточная исполнительная поверхность линз

Для цитирования: Исследование влияния наладочных параметров станка на производительность и качество процесса одновременной двусторонней обработки линз / А. С. Козерук [и др.] // *Наука и техника*. 2018. Т. 17. № 5. С. 390–400. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-390-400>

Investigation of Machine Tool Developed Settings Influence on Productivity and Quality of Simultaneous Double-Sided Lens Processing

A. S. Kozeruk¹⁾, Y. L. Malpica^{1,2)}, A. A. Sukhotzkiy¹⁾, M. I. Filonova¹⁾, V. O. Kuznechik¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Universidad Yacambu (Barquisimeto, Venezuela)

Abstract. The paper presents methodology for determining rational modes of abrasive processing for high-precision lenses while using a method of free lapping at finishing operations. Analytical expressions have been obtained to determine

Адрес для переписки

Козерук Альбин Степанович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-74-91
kipp@bntu.by

Address for correspondence

Kozeruk Albin S.
Belarusian National Technical University
22 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-74-91
kipp@bntu.by

coordinates of reference points on a spherical surface which are necessary for mathematical modeling of its processing at pivotal machines. The paper contains results of a theoretical qualitative evaluation of high-precision operating lens surfaces formation in case of various combinations of setting parameters for technological equipment. In this case the most rational and unfavorable modes of processing have been identified. In particular, the last case presupposes shaping by changing rotational frequencies of an input link in an executive mechanism of the machine tool ω_2 and the lens ω_n . An indicative feature is that a poor quality of processing has been obtained over the entire range of variation interval ω_2 at maximum value ω_n , and especially in the case when these frequencies are equal. It has been determined that the highest accuracy of processing is achieved with maximum amplitude of an oscillating tool motion, its diameter and frequency of part rotation and minimum rotational speed of the input link in the executive machine-tool mechanism. As such values of these setting parameters lead to an increased removal of an allowance in the marginal zone of a work-piece, then while processing a convex lens surface, its radius of curvature in each previous operation should be larger than a radius of curvature which is to be obtained in the process of subsequent operations. The inverse regularity of curvature radius values must be observed for a concave surface. The most advantageous values of the machine-tool setting parameters with various combinations have been proposed with the purpose to eliminate errors in the form of common as “knoll” and “hole” with due account of processing productivity and accuracy. The paper describes an influence of machine tool spindle wavering value on the processing accuracy of lenses having a wide range of diameters.

Keywords: abrasive processing, machine-tool, lens, mathematical modeling, shaping, high-accuracy executive lens surface

For citation: Kozeruk A. S., Malpica Y. L., Sukhotzkiy A. A., Filonova M. I., Kuznechik V. O. (2018) Investigation of Machine Tool Developed Settings Influence on Productivity and Quality of Simultaneous Double-Sided Lens Processing. *Science and Technique*. 17 (5), 390–400. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-390-400> (in Russian)

Введение

При обработке оптических деталей, в том числе линз, в условиях свободного притирания, когда съем припуска определяется в основном величиной скорости скольжения притирающихся поверхностей заготовки и инструмента, важен выбор таких наладочных параметров станка, при которых обеспечивается равномерное распределение упомянутой скорости по всей обрабатываемой поверхности. В настоящее время режимы обработки оптических деталей назначает рабочий-оптик исходя из своего опыта и интуиции, однако не всегда удачно. В результате не представляется возможным достичь высокой интенсивности съема припуска на исполнительной поверхности детали и, кроме того, появляются локальные погрешности в виде местных «ям» и «бугров».

Источником погрешностей оптических деталей при их обработке по классической технологии является также упругая деформация стекла, возникающая в процессе закрепления заготовок на наклеечное приспособление последовательно за каждую из рабочих поверхностей [1].

Отмеченных недостатков можно избежать, если использовать прогрессивную технологию одновременной двусторонней обработки линз при их креплении за нерабочую цилиндрическую поверхность и формализации геометрических и кинематических связей исполнительного

механизма технологического оборудования [2]. Предлагаемая технология может быть реализована на разработанном станке для одновременной двусторонней обработки высокоточной линзы малой жесткости с крутыми поверхностями [3].

Методика определения рациональных режимов обработки линз на финишных операциях

В соответствии с настоящей методикой последовательно выполняются:

- математическое моделирование процесса одновременной двусторонней обработки деталей со сферическими поверхностями по методу свободного притирания;
- получение формулы, устанавливающей функциональную связь путей резания с наладочными параметрами станка;
- расчет путей резания для различных сочетаний наладочных параметров станка;
- анализ результатов расчета и определение режимов формообразования, обеспечивающих минимальные значения относительной погрешности путей резания и времени обработки.

При определении путей резания обрабатываемую поверхность детали разбивали на элементарные площадки dS , в центре которых выбирали точки (так называемые опорные точки) и рассчитывали путь, пройденный ими относительно инструмента. Опорные точки выбирали

следующим образом. На сферической поверхности линзы радиусом R назначали n секторов (рис. 1) величиной

$$\Delta\sigma = \frac{2\pi}{n} \quad (1)$$

и m кольцевых зон размером

$$\Delta\beta = \frac{\pi(R - \sqrt{R^2 - 0,25d^2})}{2Rm}, \quad (2)$$

где d – диаметр шарового сегмента, образованного той или иной (выпуклой или вогнутой) поверхностью линзы.

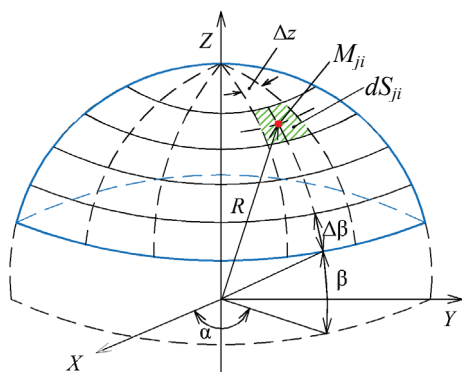


Рис. 1. К определению опорной точки на обрабатываемой поверхности линзы

Fig. 1. Determination of reference point on processed lens surface

Выражение (2) получено из следующих соображений. Если поверхность линзы составляет полусферу, то угловой размер $\Delta\beta$ каждой из m ее кольцевых зон будет $\Delta\beta = \frac{\pi}{2m}$. Если же линза не полусферическая, то необходимо определить, какую часть составляет высота сегмента ее сферической поверхности $h = R - \sqrt{R^2 - 0,25d^2}$ по сравнению с радиусом кривизны этой поверхности. Составив соответствующую пропорцию, установим, что эта часть определяется отношением $\frac{h\pi}{2R}$, разделив которое на m и получим (2).

Пересечение рассмотренных центров и зон образует nm элементарных площадок $[dS_{ji}]$; $j = \overline{1, m}$; $i = \overline{1, n}$. На каждой из этих площадок

выбираем опорную точку M_{ji} , которая расположена на пересечении луча, делящего пополам i -й сектор, и окружности, делящей пополам j -ю кольцевую зону.

Согласно рис. 1, углы σ и φ для всех точек, лежащих соответственно в одной и той же кольцевой зоне и в одном и том же секторе, можно выразить следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_i &= i\Delta\sigma - 0,5\Delta\sigma = \Delta\sigma(i - 0,5); \\ \varphi_j &= \varphi + j\Delta\varphi - 0,5\Delta\varphi = \varphi + \Delta\varphi(j - 0,5), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $\varphi = \arcsin(d/2R)$ – половина угла раствора шарового сегмента рассматриваемой поверхности линзы.

Особенностью метода одновременной двусторонней обработки линз является то, что при его реализации оба инструмента совершают переносное движение по исполнительным поверхностям детали [4], причем величина амплитуды этих движений как наладочный параметр изменяется в зависимости от технологической наследственности заготовки с точки зрения распределения подлежащего удалению припуска. Например, при наличии на детали общей погрешности в виде «ямы» необходимо усилить срабатывание краевой ее зоны, что достигается увеличением амплитуды колебательного движения инструмента, и наоборот, – для устранения погрешности типа общий «бугор» упомянутую амплитуду следует уменьшать.

С целью получения аналитических выражений, позволяющих рассчитать предельные значения обсуждаемой амплитуды в зависимости от геометрических параметров детали и инструмента, обратимся к рис. 2, на котором показаны максимальные (а) и минимальные (б) отклонения вогнутого 1 и выпуклого 2 инструментов в случае обработки линзы 3 с пологим вогнутым радиусом, когда шаровой наконечник поводка 5 входит в гнездо хвостовика 6 инструмента 2. При обработке линзы с «крутой» вогнутой поверхностью (к таковым относятся линзы, диаметр шарового сегмента которых составляет не менее 1,6 их радиуса кривизны [5]) поводок 7 (рис. 2с) жестко соединен с инструментом 2, а его шаровой наконечник входит в шарнирное соединение с выходным звеном исполнительного механизма станка (на рис. 2с не показано).

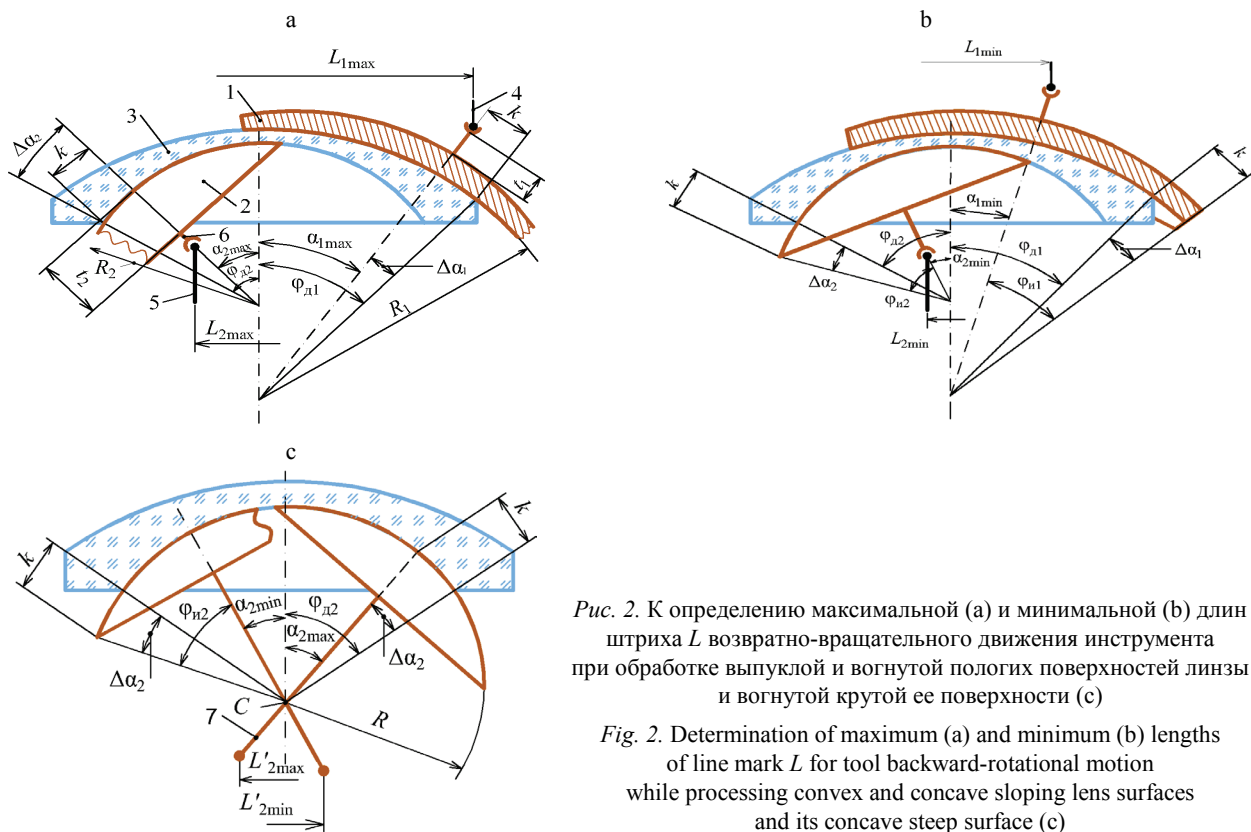


Рис. 2. К определению максимальной (а) и минимальной (б) длин штриха L возвратно-вращательного движения инструмента при обработке выпуклой и вогнутой пологих поверхностей линзы и вогнутой крутой ее поверхности (с)

Fig. 2. Determination of maximum (a) and minimum (b) lengths of line mark L for tool backward-rotational motion while processing convex and concave sloping lens surfaces and its concave steep surface (c)

Из анализа рис. 2 можно записать следующие соотношения в случае обработки выпуклой (длина штриха L_1), пологой вогнутой (длина штриха L_2) и крутой вогнутой (длина штриха L'_2) поверхностей (длина штриха представляет собой расстояние между крайними положениями поводков 4, 5 и 7 при колебательном движении инструментов, т. е. удвоенную амплитуду этого движения):

$$\left. \begin{aligned} L_{1max} &= 2(R_1 + t_1) \sin \alpha_{1max}; \\ L_{1min} &= 2(R_1 + t_1) \sin \alpha_{1min}; \\ L_{2max} &= 2(R_2 - t_2) \sin \alpha_{2max}; \\ L_{2min} &= 2(R_2 - t_2) \sin \alpha_{2min}; \\ L'_{2max} &= 2p \sin \alpha_{2max}; \\ L'_{2min} &= 2p \sin \alpha_{2min}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где R_1, R_2 – радиус кривизны выпуклой и вогнутой поверхностей линз; t_1, t_2 – величина, равная толщине соответственно вогнутого и выпуклого инструментов по центру вместе с длинами их хвостиков; $\alpha_{1max} = \varphi_{д1} - \Delta\alpha_1$, $\alpha_{1min} = \varphi_{д1} + \Delta\alpha_1 - \varphi_{и1}$ – максимальный и минимальный углы отклонения вогнутого инстру-

мента от оси симметрии детали; $\alpha_{2max} = \varphi_{д2} - \Delta\alpha_2$, $\alpha_{2min} = \varphi_{д2} + \Delta\alpha_2 - \varphi_{и2}$ – аналогичные параметры для выпуклого инструмента; $\varphi_{и1}, \varphi_{д1}$ – половина углов раствора вогнутого инструмента и шарового сегмента выпуклой поверхности детали; $\varphi_{и2}, \varphi_{д2}$ – то же для выпуклого инструмента и шарового сегмента вогнутой поверхности детали; $\Delta\alpha_1 = \arcsin(k/R_1)$, $\Delta\alpha_2 = \arcsin(k/R_2)$ – угол, обусловленный наличием расстояния k от края соответственно выпуклой и вогнутой поверхностей линзы до оси симметрии обрабатываемых этих поверхностей инструментов, с одной стороны, и до края последних, с другой, при их колебательном перемещении по детали (при отсутствии расстояния k в первом случае будет происходить раскрытие стыка между инструментом и деталью, что приведет к искажению геометрической формы поверхности линзы, а во втором случае – к образованию приподнятого края на исполнительных поверхностях линзы); p – длина поводка от оси его возвратно-вращательного движения, проходящей через центр вогнутой сферической поверхности линзы, до центра шарового наконечника этого поводка.

Теоретическую оценку качества двусторонней обработки линз выполняли следующим образом: выбирали диаметрально сечение линзы с максимальной величиной абсолютной погрешности путей резания $\Delta l = l_{\max} - l_{\min}$ после ее поворота на угол $\psi_{\max} = 4200$ рад, при котором Δl достигало минимальной величины ($l_{\max}$, $l_{\min}$ – максимальное и минимальное значения путей резания в выбранном диаметрально сечении линзы). Разделив Δl на максимальное значение путей резания l в выбранном сечении, получим $\Delta l_{\text{отн}}$, которое пропорционально погрешности детали в данном сечении.

Используя математическую модель процесса формообразования сферических поверхностей в условиях свободного притирания, изложенную в [6], и аналитическое выражение для определения путей резания, приведенное в [7], рассчитаем $\Delta l_{\text{отн}}$ при различных комбинациях следующих регулируемых (наладочных) пара-

метров станка: частоты вращения линзы ω_l , диаметра инструмента d_n , величины амплитуды возвратно-вращательного движения инструмента L , частоты вращения входного звена исполнительного механизма станка, а также отношения $K = \omega_n / \omega_l$, где ω_n – частота вращения инструмента. При этом диапазон значений для L определяли по формулам (4), а для остальных параметров использовали данные производственной практики [8]. В итоге получили следующие границы изменения отмеченных наладочных параметров: $\omega_l = 2\text{--}10 \text{ c}^{-1}$; $d_n = 70\text{--}94 \text{ мм}$; $L = 45\text{--}58 \text{ мм}$; $\omega_2 = 0,5\text{--}8,5 \text{ c}^{-1}$; $k = 0,72\text{--}0,88$.

Теоретические исследования

Результаты расчета $\Delta l_{\text{отн}}$ совместно с давлением (параметр Δq) в зоне притирающихся поверхностей инструмента и детали для сочетаний K и L , L и ω_2 , K и ω_l , а также ω_l и ω_2 , что допустимо на стадии шлифования, приведены на рис. 3.

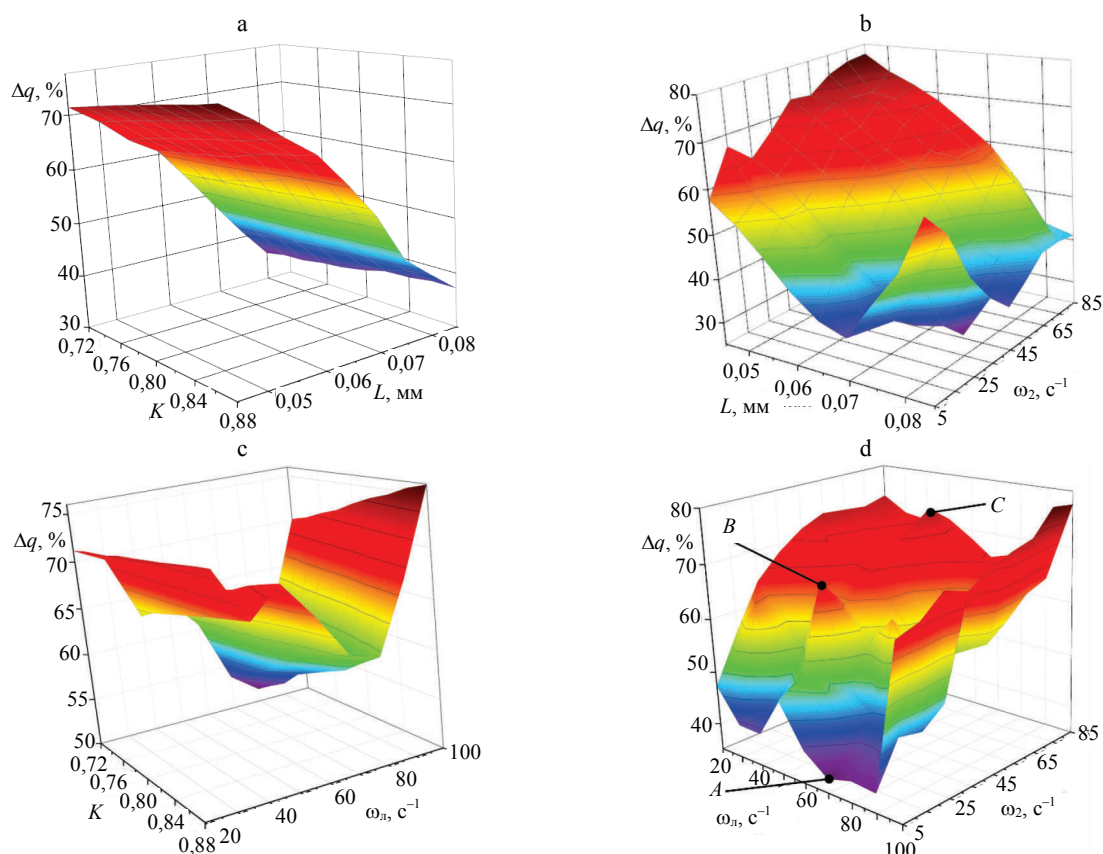


Рис. 3. Зависимость погрешности обработки Δq от наладочных параметров станка следующих комбинаций: K , L при $d_n = 82 \text{ мм}$, $\omega_2 = 4,5 \text{ c}^{-1}$, $\omega_l = 6,0 \text{ c}^{-1}$ (a); K , ω_2 при $d_n = 82 \text{ мм}$, $\omega_l = 6,0 \text{ c}^{-1}$, $K = 0,76$ (b); K , ω_l при $d_n = 82 \text{ мм}$, $\omega_2 = 4,5 \text{ c}^{-1}$, $L = 60 \text{ мм}$ (c); ω_2 , ω_l при $L = 60 \text{ мм}$, $d_n = 82 \text{ мм}$, $K = 0,76$ (d)

Fig. 3. Dependence of processing error Δq on machine settings in following combinations: K , L at $d_n = 82 \text{ мм}$, $\omega_2 = 4.5 \text{ s}^{-1}$, $\omega_l = 6.0 \text{ s}^{-1}$ (a); K , ω_2 at $d_n = 82 \text{ мм}$, $\omega_l = 6.0 \text{ s}^{-1}$, $K = 0.76$ (b); K , ω_l at $d_n = 82 \text{ мм}$, $\omega_2 = 4.5 \text{ s}^{-1}$, $L = 60 \text{ мм}$ (c); ω_2 , ω_l at $L = 60 \text{ мм}$, $d_n = 82 \text{ мм}$, $K = 0.76$ (d)

Из анализа этого рисунка следует, что при управлении процессом формообразования посредством регулирования величин K и L (рис. 3а) происходит плавное изменение Δq , причем с увеличением L Δq уменьшается, а с увеличением K , наоборот, Δq возрастает. Однако при увеличении L и ω_2 Δq изменяется не плавно (рис. 3б) и своего наибольшего значения достигает при максимальном ω_2 и минимальном L , а наименьшего – при $\omega_2 = 3,5 \text{ с}^{-1}$ и $L = 80 \text{ мм}$. Имеются и другие сочетания значений ω_2 и L , в случае которых наблюдается удовлетворительная точность обработки, например: $\omega_2 = 2,5 \text{ с}^{-1}$ и $L = 75 \text{ мм}$; $\omega_2 = 3,5 \text{ с}^{-1}$ и $L = 75 \text{ мм}$; $\omega_2 = 0,5 \text{ с}^{-1}$ и $L = 70 \text{ мм}$ и др. Кроме того, в диапазоне изменений ω_2 от $4,5$ до $5,5 \text{ с}^{-1}$ происходит «излом» поверхности распределения Δq (ω_2 , L) в сторону уменьшения Δq на всем интервале значений L , а при минимальном значении ω_2 и максимальном L – резкое ухудшение точности обработки.

Результаты расчета Δq (K , ω_n) (рис. 3с) показывают, что если в угловых зонах поверхности распределения Δq точность обработки принимает свои наихудшие значения, то при $\omega_n = 4 \text{ с}^{-1}$ и $\omega_n = 8 \text{ с}^{-1}$ во всем диапазоне изменения K точность обработки улучшается, причем в большей степени во втором случае.

Наиболее неблагоприятное распределение Δq из всех возможных комбинаций наладочных параметров станка, как показали расчеты, имеет место при управлении процессом формообразования посредством изменений ω_2 и ω_n (рис. 3д). Характерным здесь является то, что при максимальном значении ω_n получается низкое качество обработки на всем интервале изменения ω_2 . Заметное ухудшение точности происходит и при $\omega_n = 5 \text{ с}^{-1}$, и особенно в случаях $\omega_2 = 2,5 \text{ с}^{-1}$ и $\omega_2 = 7,5 \text{ с}^{-1}$, а при $\omega_2 = 5,0 \text{ с}^{-1}$, как показали дополнительные расчеты, $\Delta q = 100 \%$, т. е. на поверхности линзы имеются точки, которые в пределах выбранного угла поворота $\psi_{\max} = 4200 \text{ рад}$ не контактируют с инструментом и, следовательно, не обрабатываются. В рассматриваемой комбинации наладочных параметров станка такая ситуация имеет место при любых значениях ω_2 и ω_n в случае их равенств.

Что касается закономерностей изменения Δq для остальных комбинаций наладочных параметров станка, то можно отметить следующее:

K , d_n : Δq распределяется таким же образом, как и в случае комбинации K , L , т. е. с увеличением K точность обработки ухудшается, а с увеличением d_n улучшается, причем наивысшей точности можно достичь при максимальном значении d_n и минимальном K ;

K , ω_2 : поверхность распределения Δq при $\omega_2 = 2,5 \text{ с}^{-1}$ имеет небольшой «излом» в сторону уменьшения Δq , минимум которого достигается при наименьших значениях K и ω_2 , а при их максимальных значениях точность обработки самая низкая;

d_n , L ; ω_n , L и ω_n , d_n : поверхность распределения Δq не гладкая (как на рис. 3д), причем наихудшая точность обработки получается при минимальных значениях наладочных параметров рассматриваемых сочетаний, а наивысшая – при их стремлении к максимальным значениям;

d_n , ω_2 : поверхность распределения Δq не гладкая; наивысшая точность формообразования имеет место при минимальном значении ω_2 и максимальном d_n , а самая низкая, наоборот, – при минимальном d_n и максимальном ω_2 .

Кроме отмеченного, выполненные расчеты показывают, что наивысшая точность обработки достигается, как правило, при максимальных L , d_n , ω_n и минимальных ω_2 и K . А поскольку такие значения этих наладочных параметров приводят, как известно [9], к усиленному съему припуска в краевой зоне заготовки, то, следовательно, при обработке выпуклой поверхности линзы ее радиус кривизны на каждой предшествующей операции должен быть больше по сравнению с радиусом кривизны, который необходимо получить на последующих операциях. Для вогнутой поверхности должна соблюдаться обратная закономерность значений радиуса кривизны.

Результаты численных исследований продолжительности обработки t в случае регулирования процесса посредством изменений ω_n и ω_2 представлены на рис. 4.

При использовании остальных сочетаний рассматриваемых наладочных параметров станка получены аналогичные закономерности, для которых характерно, как и в случае рис. 4, минимальное t при максимально интенсивных режимах обработки. Значение времени t приведено в табл. 1.

Характерной особенностью обработки высокоточных линз по методу свободного притирания является непрерывное изменение значения их радиуса кривизны R . Для целенаправленного этого изменения требуется определенное регулирование тех или иных наладочных параметров технологического оборудования. В [10] показано, что для уменьшения R линзы (для устранения погрешности в виде общей «ямы») L , d_n и ω_n необходимо увеличивать, а ω_2 и K – уменьшать. С целью увеличения R (для устранения погрешности в виде общего «бугра») упомянутые наладочные параметры следует изменять в обратном направлении.

С учетом изложенного можно предложить наиболее выгодные значения наладочных параметров станка различных комбинаций для устранения погрешностей в виде общих как «бугра», так и «ямы» с учетом производитель-

ности и точности обработки. Результаты подбора таких комбинаций для выпуклой поверхности линзы приведены в табл. 2.

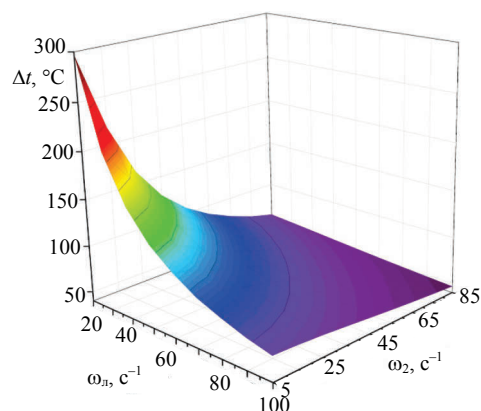


Рис. 4. Зависимость времени обработки t от наладочных параметров станка комбинации ω_2 , ω_n

Fig. 4. Dependence of processing time period t on machine settings in combination ω_2 , ω_n

Таблица 1

Время обработки t для различных комбинаций наладочных параметров станка

Processing time period t for various combinations of machine settings

t , с, при комбинации									
44,6	46,8	48,2	49,4	50,4	53,5	53,5	57,2	61,7	64,9
$\omega_2 = 8,5$, $L = 85$	$\omega_1 = 10$, $\omega_2 = 8,5$	$d_n = 94$, $\omega_n = 10$	$\omega_n = 10$, $L = 85$	$d_n = 94$, $\omega_n = 10$	$K = 0,88$, $\omega_2 = 8,5$	$d_n = 94$, $L = 85$	$K = 0,72$, $\omega_n = 10$	$K = 0,88$, $L = 85$	$K = 0,88$, $d_n = 94$

Примечание. L и d даны в мм, ω_n и ω_2 в c^{-1} .

Таблица 2

Значения наладочных параметров станка различных комбинаций для устранения погрешности в виде общих «бугра» и «ямы»

Values of machine settings for various combinations in order to remove errors in the form of common “knoll” and “hole”

Для устранения общего «бугра»			Для устранения общей «ямы»		
Наладочные параметры	Δq , %	t , с	Наладочные параметры	Δq , %	t , с
$K = 0,84$; $L = 60$ мм	65	74	$K = 0,72$; $L = 85$ мм	34	64
$L = 60$ мм; $\omega_2 = 8,5 c^{-1}$	68	54	$L = 70$ мм; $\omega_2 = 0,5 c^{-1}$	34	100
$K = 0,84$; $\omega_n = 4,0 c^{-1}$	66	88	$K = 0,72$; $\omega_n = 8,0 c^{-1}$	51	65
$\omega_n = 4,0 c^{-1}$; $\omega_2 = 7,5 c^{-1}$	69	64	$\omega_n = 7,0 c^{-1}$; $\omega_2 = 0,5 c^{-1}$	38	92
$K = 0,84$; $d_n = 79$ мм	69	77	$K = 0,72$; $d_n = 94$ мм	47	68
$K = 0,84$; $\omega_2 = 6,5 c^{-1}$	67	62	$K = 0,72$; $\omega_2 = 0,5 c^{-1}$	41	108
$d_n = 79$ мм; $L = 65$ мм	58	74	$d_n = 88$ мм; $L = 80$ мм	38	59
$\omega_n = 4,0 c^{-1}$; $L = 55$ мм	66	95	$\omega_n = 8,0 c^{-1}$; $L = 80$ мм	24	56
$d_n = 85$ мм; $\omega_n = 6,0 c^{-1}$	58	73	$d_n = 91$ мм; $\omega_n = 8,0 c^{-1}$	38	59
$d_n = 79$ мм; $\omega_2 = 8,5 c^{-1}$	71	56	$d_n = 88$ мм; $\omega_2 = 0,5 c^{-1}$	40	101

Данные табл. 2 позволяют назначить оптимальные сочетания наладочных параметров станка в каждом конкретном случае. Так, при необходимости устранить общий «бугор» на высокоточной выпуклой поверхности линзы целесообразно использовать комбинацию K и L . Если же поверхность линзы средней точности, то для исправления «бугра» можно выбрать более производительный режим обработки, т. е. назначить комбинацию L и ω_2 . Для исправления погрешности в виде общей «ямы» лучше всего использовать комбинацию ω_L и L , при которой обеспечиваются самые высокие как производительность обработки, так и ее качество. Однако нецелесообразно назначать комбинации L и ω_2 , K и ω_2 , а также d_H и ω_2 , не позволяющие интенсифицировать процесс съема припуска, хотя в этих случаях достигаются сравнительно малые значения Δk .

Особенностью разработанного технологического оборудования для одновременной двусторонней обработки линз является возможность независимого регулирования его наладочных параметров для обеих поверхностей детали, за исключением частоты ее вращения, которая применяется одинаковой. С учетом этого проведены расчеты Δq и t для вогнутой поверхности линзы радиусом кривизны 50,34 мм и диаметром 80 мм, позволяющие, как и для выпуклой поверхности, устанавливать оптимальные режимы работы станка в зависимости от характера распределения подлежащего удалению припуска.

Характерным для станка двусторонней обработки линз является также наличие в нем приводов обоих притирающихся звеньев – заготовки и инструментов. Это значит, что по сравнению с классической технологией, в которой значение K самопроизвольно и хаотично изменяется в пределах 0,7–0,9 и поэтому не может служить в качестве наладочного параметра, в рассматриваемом станке отношение ω_H/ω можно изменять целенаправленно, т. е. использовать его для управления процессом формообразования высокоточных исполнительных поверхностей деталей, что расширяет технологические возможности станка.

Результаты численных исследований зависимости $\Delta q_{отн}$ от изменения K в различных его комбинациях с другими регулируемыми параметрами изложены на рис. 5. Анализ этого рисунка показывает, что все рассматриваемые комбинации наладочных параметров обеспечи-

вают сравнительно высокую точность обработки при изменении K в пределах от минимального его значения до 0,6. Причем наилучший результат наблюдается для комбинации K, L (кривая 1) и несколько худший – для K, ω_2 (кривая 2) и K, d_H (кривая 3), а для комбинации K, ω_L при $K > 0,6$ (кривая 4) погрешность обработки становится неприемлемой.

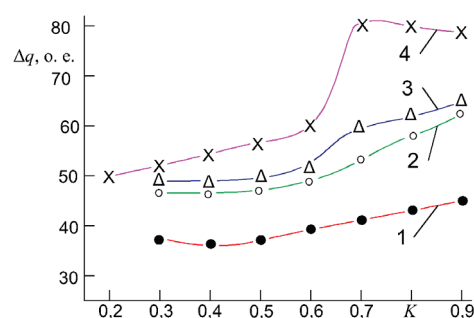


Рис. 5. Зависимость погрешности обработки $\Delta q_{отн}$ от наладочного параметра станка K в следующих комбинациях: K, L при $L = 75$ мм, $d_H = 82$ мм, $\omega_2 = 4,5$ с⁻¹, $\omega_L = 6,0$ с⁻¹ (1); K, ω_2 при $\omega_2 = 4,5$ с⁻¹, $d_H = 82$ мм, $\omega_L = 6,0$ с⁻¹, $L = 60$ мм (2); K, d_H при $d_H = 85$ мм, $\omega_2 = 4,5$ с⁻¹, $\omega_L = 6,0$ с⁻¹, $L = 60$ мм (3); K, ω_L при $\omega_L = 5,0$ с⁻¹, $d_H = 82$ мм, $\omega_2 = 4,5$ с⁻¹, $L = 60$ мм (4)

Fig. 5. Dependence of processing error $\Delta q_{отн}$ on machine settings K in following combinations:

K, L at $L = 75$ mm, $d_H = 82$ mm, $\omega_2 = 4.5$ s⁻¹, $\omega_L = 6.0$ s⁻¹ (1); K, ω_2 at $\omega_2 = 4.5$ s⁻¹, $d_H = 82$ mm, $\omega_L = 6.0$ s⁻¹, $L = 60$ mm (2); K, d_H at $d_H = 85$ mm, $\omega_2 = 4.5$ s⁻¹, $\omega_L = 6.0$ s⁻¹, $L = 60$ mm (3); K, ω_L at $\omega_L = 5.0$ s⁻¹, $d_H = 82$ mm, $\omega_2 = 4.5$ s⁻¹, $L = 60$ mm (4)

При получении оптических деталей по методу свободного притирания на точность обработанной поверхности влияет не только величина наладочных параметров станка (кинематическая составляющая погрешности), но и биение в шарнирных соединениях его подвижных звеньев (динамическая составляющая погрешности), в частности биение шпинделя с закрепленным на нем инструментом или заготовкой. Для выяснения влияния данного фактора на точность линз диаметром от 30 до 120 мм (наиболее часто встречающиеся размеры линз) с допуском на отклонение радиуса кривизны исполнительной поверхности в пределах от $\pm 0,25$ до $\pm 1,00$ мкм проводилась обработка (заклЮчительная стадия шлифования и этап полирования) линз из стекла марки К8 на рычажных шлифовально-полировальных станках с биением их шпинделей от ± 3 до ± 9 мкм. Контроль точности отполированной поверхности детали выполняли посредством измерения местной (локальной) погрешности ΔN (величина откло-

нения интерференционного кольца Ньютона от правильной геометрической формы, деленной на ширину этого кольца) на интерферометре KUI-35/RME-500.

В процессе полирования детали изменяли (уменьшали) частоту вращения шпинделя станка $\omega_{\text{шп}}$ с закрепленной на нем деталью до достижения $\Delta N = \pm 0,10$, что соответствовало микронеровностям на обработанной поверхности величиной $\pm 0,25$ мкм.

Полученные результаты исследований, представленные в табл. 3, позволяют выявить максимально допустимую частоту вращения шпинделя станка в зависимости от величины его биения. Причем, как оказалось, с увеличением диаметра линзы допустимая частота вращения шпинделя, независимо от величины его биения, уменьшается.

Таблица 3

Допустимые значения частоты вращения шпинделя станка $\omega_{\text{шп}}$ в зависимости от величины его биений $\Delta_{\text{шп}}$, диаметра детали d_d и точности радиусов кривизны ее исполнительных поверхностей ΔR

Admissible values for rotational rate of machine tool spindle $\omega_{\text{шп}}$ according to its wavering $\Delta_{\text{шп}}$, working piece diameter d_d and accuracy in curvature radius for its executive surfaces ΔR

d_d , мм	ΔR , мкм	$\Delta_{\text{шп}}$, мкм	ω_d , с ⁻¹
30–50	$\pm 0,25$	± 3	4,8
		± 6	3,8
		± 9	3,4
	$\pm 0,50$	± 3	6,8
		± 6	6,2
		± 9	5,2
	$\pm 1,00$	± 3	10,4
		± 6	9,88
		± 9	7,81
50–80	$\pm 0,25$	± 3	3,2
		± 6	2,8
		± 9	1,8
	$\pm 0,50$	± 3	4,9
		± 6	4,2
		± 9	3,6
	$\pm 1,00$	± 3	7,7
		± 6	7,2
		± 9	6,1
80–120	$\pm 0,25$	± 3	2,7
		± 6	2,7
		± 9	1,5
	$\pm 0,50$	± 3	3,9
		± 6	3,6
		± 9	3,2
	$\pm 1,00$	± 3	6,8
		± 6	6,2
		± 9	5,5

Экспериментальные исследования

Для проверки вышеизложенных результатов расчета проводились экспериментальные исследования процесса обработки выпуклой поверхности линзы радиусом кривизны 120,85 мм на этапе основного шлифования и на стадии полирования. Использовались полировально-доводочные станки модели 6ПД200 (отдельно для шлифования и полирования) с автоматической подачей рабочей суспензии, в качестве которой для шлифования применялась абразивная суспензия белого электрокорунда зернистостью М20 в соотношении твердой фазы Т к жидкой Ж 1:5, а полирование выполнялось суспензией полирита (двуокиси церия) составом Т:Ж = 1:10. В качестве инструментов служили чугунный шлифовальник и пенополиуретановый полировальник (пенополиуретановая пленка толщиной 1 мм, наклеенная на металлический корпус). Для поддержания исходной величины радиуса кривизны инструментов применялись предварительно налаженные алмазные правильники в виде грибов с наклеенными алмазосодержащими элементами из синтетического алмаза АСМ 200/160 на медной связке.

В процессе шлифования с помощью кольцевого сферометра с микронным индикатором часового типа измеряли стрелку прогиба h и определяли величину $\Delta h = h - h_0$, где $h_0 = \sqrt{R_0 - d^2/4}$ – стрелка прогиба выпуклой сферической поверхности номинальным радиусом кривизны $R_0 = 120,85$ мм; $d = 90$ мм – внутренний диаметр кольца сферометра. Перед началом каждого цикла шлифования обеспечивали $\Delta h = 15$ мкм в виде погрешности общей «ямы». Заготовку с такой погрешностью шлифовали 15 мин при рабочем давлении 90 г/см², а измерение h выполняли три раза и находили ее среднее значение.

Локальную погрешность ΔN определяли с помощью интерферометра KUI-35/RME-500.

Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 6, 7. На рис. 6 показаны закономерности изменения Δh в зависимости от продолжительности обработки t для комбинации наладочных параметров L , ω_2 ; K , ω_2 и K , d_n (кривые соответственно 1, 2 и 3). Для первой

из этих комбинаций Δh за время обработки изменилось на 12 мкм, для второй – на 8 мкм, а для третьей – на 5 мкм. Это значит, что при величине амплитуды колебательных движений инструмента $L = 85$ мм и 85 двойных его ходов в минуту ($\omega_2 = 8,5 \text{ с}^{-1}$) интенсивность съема припуска самая высокая (кривая 1), а в случае комбинации $K = 0,88$ и $\omega_2 = 8,5 \text{ с}^{-1}$ наблюдается средняя производительность (кривая 2). Эти данные согласуются с результатами численных исследований, приведенных в табл. 1 (колонки 1, 6, 10).

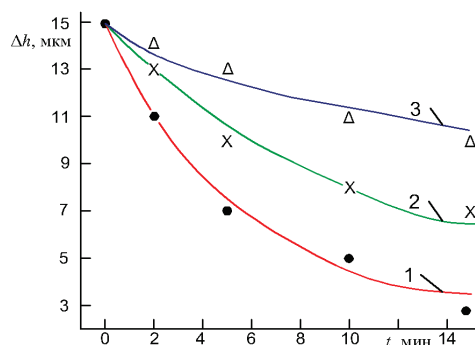


Рис. 6. Зависимость отклонения стрелки прогиба Δh от времени обработки t при следующих значениях наладочных параметров станка: $L = 85$ мм, $\omega_2 = 8,5 \text{ с}^{-1}$, $d_n = 82$ мм, $\omega_n = 6,0 \text{ с}^{-1}$, $K = 0,76$ (1); $K = 0,88$, $\omega_2 = 8,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 60$ мм, $d_n = 82$ мм, $\omega_n = 6,0 \text{ с}^{-1}$ (2); $K = 0,88$, $d_n = 94$ мм, $\omega_n = 6,0 \text{ с}^{-1}$, $L = 60$ мм, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$ (3)

Fig. 6. Dependence of maximum deflection Δh on processing time period t at following values of machine settings: $L = 85$ mm, $\omega_2 = 8.5 \text{ s}^{-1}$, $d_n = 82$ mm, $\omega_n = 6.0 \text{ s}^{-1}$, $K = 0.76$ (1); $K = 0.88$, $\omega_2 = 8.5 \text{ s}^{-1}$, $L = 60$ mm, $d_n = 82$ mm, $\omega_n = 6.0 \text{ s}^{-1}$ (2); $K = 0.88$, $d_n = 94$ mm, $\omega_n = 6.0 \text{ s}^{-1}$, $L = 60$ mm, $\omega_2 = 4.5 \text{ s}^{-1}$ (3)

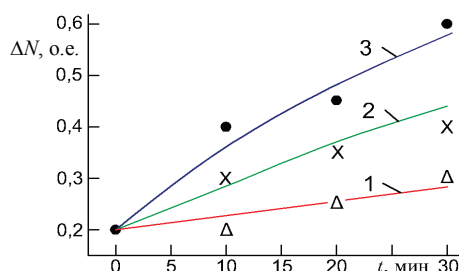


Рис. 7. Зависимость локальной погрешности ΔN от времени обработки t при следующих значениях наладочных параметров станка: $\omega_n = 7,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_2 = 0,5 \text{ с}^{-1}$ (1); $\omega_n = 5,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_2 = 2,5 \text{ с}^{-1}$ (2); $\omega_n = 5,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_2 = 7,5 \text{ с}^{-1}$ (3) ($L = 60$ мм, $d_n = 82$ мм, $K = 0,76$ – для всех случаев)

Fig. 7. Dependence of local error ΔN on processing time period t at following values of machine settings: $\omega_n = 7.0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_2 = 0.5 \text{ s}^{-1}$ (1); $\omega_n = 5.0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_2 = 2.5 \text{ s}^{-1}$ (2); $\omega_n = 5.0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_2 = 7.5 \text{ s}^{-1}$ (3) $L = 60$ mm, $d_n = 82$ mm, $K = 0.76$ – for all cases

Из экспериментальных кривых на рис. 7 следует, что при комбинации частот вращения линзы $\omega_n = 7,0 \text{ с}^{-1}$ и входного звена исполнительного механизма станка $\omega_2 = 0,5 \text{ с}^{-1}$ исходная погрешность на поверхности линзы $\Delta N = 0,2$ изменяется на 0,1, при $\omega_n = 5,0 \text{ с}^{-1}$ и $\omega_2 = 2,5 \text{ с}^{-1}$ на 0,2, а в случае $\omega_n = 5,0 \text{ с}^{-1}$ и $\omega_2 = 7,5 \text{ с}^{-1}$ происходит самое существенное изменение ΔN – на 0,4. Это значит, что наиболее точная обработка (полирование) может быть достигнута в первой из отмеченных комбинаций ω_2 и ω_n , а самая низкая – в третьей, что удовлетворительно коррелирует с результатами численных исследований, приведенных на рис. 3d (точки A, B, C).

ВЫВОДЫ

1. Проведенные численные исследования обработки сферических поверхностей оптических деталей по методу свободного притирания позволили выявить, что при управлении процессом формообразования посредством изменения частот вращения линзы ω_n и входного звена исполнительного механизма станка ω_2 достичь высокой точности исполнительной поверхности детали не представляется возможным, особенно в случае $\omega_2 = \omega_n$ при любых их значениях.

2. Расчеты показали, что наивысшая точность обработки достигается при максимальных значениях амплитуды колебательного движения инструмента, его диаметра и частоты вращения линзы и минимальных значениях частоты вращения входного звена исполнительного механизма станка и отношения частоты вращения инструмента к частоте вращения линзы. А поскольку такие значения данных наладочных параметров приводят к усиленному съему припуска в краевой зоне заготовки, при обработке выпуклой поверхности линзы ее радиус кривизны на каждой предшествующей операции должен быть больше по сравнению с радиусом кривизны, который необходимо получить на последующих операциях. Для вогнутой поверхности должна соблюдаться обратная закономерность значений радиуса кривизны.

3. При экспериментальном исследовании влияния динамической составляющей погрешности обработки линз на рычажных шлифовально-полировальных станках установлено, что с увеличением диаметра детали допустимая частота вращения шпинделя станка с закреп-

ленной на нем заготовкой, независимо от величины его биения, уменьшается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бардин, А. Н. Технология оптического стекла / А. Н. Бардин. М.: Высш. шк., 1963. 519 с.
2. Способ одновременной двусторонней обработки деталей со сферическими поверхностями: пат. 7911 Респ. Беларусь, МПК В 24В 13/00 / А. С. Козерук, И. П. Филонов; дата публ. 30.04.2006.
3. Станок для одновременной двусторонней обработки линз с крутыми вогнутыми поверхностями: пат. 10726 Респ. Беларусь, МПК В 24В 13/00 / А. С. Козерук, И. П. Филонов, А. А. Сухоцкий, В. Ф. Климович, Е. С. Таболина; дата публ. 30.06.2008.
4. Исследование кинематических закономерностей процесса двусторонней обработки двояковыпуклых оптических деталей / А. С. Козерук [и др.] // Вес. Нац. акад. наук. Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2008. № 2. С. 26–31.
5. Козерук, А. С. Формообразование прецизионных поверхностей / А. С. Козерук. Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1997. 176 с.
6. Козерук, А. С. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов на основе математического моделирования / А. С. Козерук. Минск, 1997. 317 с.
7. Филонов, И. П. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов / И. П. Филонов, Ф. Ф. Климович, А. С. Козерук. Минск: ДизайнПРО, 1995. 208 с.
8. Сулим, А. М. Производство оптических деталей / А. В. Сулим. М.: Высш. шк., 1969. 303 с.
9. Зубаков, В. Г. Технология оптических деталей / В. Г. Зубаков, М. Н. Семибратов, С. К. Штандель; под ред. М. Н. Семибратова. М.: Машиностроение, 1985. 368 с.
10. Технологические особенности процесса одновременной двусторонней обработки высокоточных линз малой жесткости / А. С. Козерук [и др.] // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 3. С. 215–234. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-3-215-234>.

Поступила 27.03.2018

Подписана в печать 04.06.2018

Опубликована онлайн 28.09.2018

REFERENCES

1. Bardin A. N. (1963) *Technology of Optical Glass*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 519 (in Russian).
2. Kozeruk A. S., Filonov I. P. (2006) *Method for Simultaneous Double-Sided Processing of Parts with Spherical Surface*: Patent No 7911 Republic of Belarus (in Russian).
3. Kozeruk A. S., Filonov I. P., Sukhotsky A. A., Klimovich V. F., Tabolina E. S. (2008) *Machine-Tool for Simultaneous Double-Sided Processing of Lenses with Steep Concave Surface*: Patent No 10726 Republic of Belarus (in Russian).
4. Kozeruk A. S., Sukhotskii A. A., Klimovich V. F., Filonova M. I. (2008) Investigation of Kinematic Regularities in Double-Sided Processing of Double Convex Optical Parts. *Vestsi Natsyional'nei Akademii Navuk Belarusi. Ser. Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarusi. Physico-Technical Series*, (2), 26–31 (in Russian).
5. Kozeruk A. S. (1997) *Precision Surface Formation*. Minsk, VUZ-UNITI Publ. 176 (in Russian).
6. Kozeruk A. S. (1997) *Control of Precision Surface Formation in Parts of Machines and Devices on the Basis of Mathematical Simulation*. Minsk. 317 (in Russian).
7. Filonov I. P., Klimovich F. F., Kozeruk A. S. (1995) *Control of Precision Surface Formation in Parts of Machines and Devices*. Minsk, DesignPRO Publ. 208 (in Russian).
8. Sulim A. M. (1969) *Production of Optical Parts*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 303 (in Russian).
9. Zubakov V. G., Semibratov M. N., Shtandel S. K. (1985) *Technology of Optical Parts*. Moscow, Mashinostroyenie Publ. 368 (in Russian).
10. Kozeruk A. S., Filonov I. P., Filonova M. I., Vlasovetz N. S., Malpika D. L. (2017) Technological Distinctive Features Pertaining to Process of Simultaneous Two-Sided Machining of High-Precision Lenses Having Low Stiffness. Technological Peculiarities in Simultaneous Double-Sided Processing of High-Precision Lenses of Small Rigidity. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 16 (3), 215–234 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-3-215-234>.

Received: 27.03.2018

Accepted: 04.06.2018

Published online: 28.09.2018

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-401-412>

УДК 656

Управление в интеллектуальной транспортной системе г. Минска

Докт. техн. наук Д. В. Капский¹⁾, Д. В. Навой¹⁾, докт. техн. наук П. А. Пегин²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. В статье рассмотрены алгоритмы поиска максимального объема движения дорожных транспортных средств в светофорном цикле при распределенном импульсе интенсивности и оптимизации сдвигов при координированном регулировании движения транспортных потоков. Выполнено моделирование транспортных потоков с использованием разработанной авторами компьютерной программы, что позволило повысить эффективность управления дорожным движением за счет учета распределенного импульса интенсивности транспорта. Предложена модель для минимизации суммарных потерь в дорожном движении при интеграции подсистемы контроля инцидентов и маршрутного ориентирования и автоматизированной системы управления дорожным движением в составе интеллектуальной транспортной системы г. Минска, которая исследована в качестве инструмента для моделирования системы автоматизированного проектирования «Магистральное управление». Модель, минимизирующая задержки автомобилей, использует алгоритм реализации по параметрам интенсивностей транспортных потоков в зависимости от времени суток, дней недели. В результате моделирования выявлено, что наиболее эффективным параметром является показатель задержек автомобилей, который не всегда удовлетворяет водителей, стремящихся выбирать маршруты своего движения исходя из минимальной скорости сообщения. Однако, с точки зрения управления интеллектуальной транспортной системой, необходимо выбирать параметры с учетом требований минимизации задержек на улично-дорожной сети крупнейшего города нашей страны. Предложенные алгоритмы и модели применяются в автоматизированной системе управления дорожным движением города Минска и будут использованы при создании целостной интеллектуальной транспортной системы города.

Ключевые слова: дорожное движение, управление движением, алгоритмы управления, автоматизированная система управления дорожным движением, интеллектуальная транспортная система, эффективность, качество, координированное регулирование

Для цитирования: Капский, Д. В. Управление в интеллектуальной транспортной системе г. Минска / Д. В. Капский, Д. В. Навой, П. А. Пегин // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 5. С. 401–412. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-401-412>

Control of Intelligent Transport System in Minsk

D. V. Kapskiy¹⁾, D. V. Navoy¹⁾, P. A. Pegin²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (Saint Petersburg, Russian Federation)

Abstract. The paper considers algorithms for searching a maximum traffic volume of road vehicles in a traffic light cycle with a distributed intensity pulse and optimization of shifts under coordinated traffic flow control. Modeling of traffic flows have been made while using a computer program developed by the authors and it has made it possible to improve efficiency of traffic management by taking into account the distributed pulse of transport intensity. The paper proposes a model for minimizing total losses in road traffic during the integration of an incident control sub-system and route guidance for

Адрес для переписки

Капский Денис Васильевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-95-70
oapdd_atf@bntu.by

Address for correspondence

Kapskiy Denis V.
Belarusian National Technical University
12 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-95-70
oapdd_atf@bntu.by

and an automatic road traffic management system as part of Minsk intelligent transportation system which has been studied as a tool for modeling a computer-aided design system "Backbone management". The model that minimizes vehicle delays, uses an algorithm implementing traffic flow intensity parameters depending on the time of day, days of the week. As a result of the simulation it has been revealed that the most effective parameter is an indicator of vehicle delays which does not always satisfy drivers trying to choose routes of their traffic which are based on a minimum transportation speed. However, from the point of view of managing an intelligent transportation system, it is necessary to choose parameters based on the requirements for minimizing delays on the road traffic network of the largest city in our country. All the proposed algorithms and models are used in the automatic traffic management system of Minsk city and will be used while creating an integrated intellectual transportation system of the city.

Keywords: road traffic, traffic management, management algorithms, automatic traffic management system, intelligent transportation systems, efficiency, quality, coordinated regulation

For citation: Kapskiy D. V., Navoy D. V., Pegin P. A. (2018) Control of Intelligent Transport System in Minsk. *Science and Technique*. 17 (5), 401–412. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-401-412>(in Russian)

Введение

Предоставление информации о рекомендуемом маршруте следования – инструмент влияния на поведение пользователей. Оптимизация маршрута может идти по различным параметрам (время сообщения по маршруту, задержки на улично-дорожной сети (УДС), оптимальное положение системы и оптимальные параметры для пользователя). Системы контроля инцидентов и маршрутного ориентирования могут быть использованы в повседневных условиях дорожного движения, а особенно при инциденте. В случае инцидента пользователи извлекают непосредственную выгоду от использования системы [1–3]. Существуют три способа получить информацию о предполагаемом маршруте, по которому поедет пользователь. Первый – перед поездкой доведение информации, например, посредством радио, телевидения или Интернета. Таким образом, пользователь получает информацию, ее обновление и планирует маршрут движения, в том числе с отказом от использования личного транспорта в пользу общественного. Второй способ – это информационные электронные табло (динамические информационные табло), отображающие информацию о маршруте в стратегически важных точках УДС [4–6]. Третий способ – рекомендации, которые доводятся до пользователей посредством бортовых систем навигации автомобилей или с помощью смартфонов. Помимо цели создания системы ориентирования, есть также различные типы стратегий. Итеративная стратегия осуществляет повторный процесс моделирования для достижения оптимальных целей (либо системы или оптимальных пользователей). Этот подход может быть введен в модель интеллектуального управления. Его трудно применять на практике для операций в реальном времени, так как требуется много вычис-

лений. Другой тип – группа одноразовых стратегий. В этой группе находятся реактивные подходы управления или (реже) прогнозные подходы (где модель используется для прогнозирования в ближайшем будущем) [1, 7].

Предлагаемое решение проблемы

Простейшее правило принятия решений – выбор кратчайшего пути [8]. В большинстве случаев расширение используемых маршрутов является более эффективным подходом, который может быть достигнут с помощью стохастических моделей, основанных на случайной полезной модели. Полиномиальная логит-модель [9] может использоваться для выбора альтернативного маршрута, если он независим. Этот метод учитывает, что маршрут менее выражен, если ссылки используются также в других маршрутах. Модель «с-логит» [9] делает подобную вещь с помощью коэффициента общности.

Существуют различные стратегии управления дорожным движением: на локальном, магистральном и сетевом уровнях. Для офлайн-управления сетью широко используется модель TRANSYT [10], когда заранее по статистическим данным разрабатываются планы координации. В режиме реального времени и с использованием адаптивного управления широко известны такие модели, как SCATS [11] и SCOOT [12], которые разработаны и апробированы в 70-е и 80-е гг. прошлого века. Другие аналогичные, но не часто используемые, системы: OPAC [13], французская PRODYN [14], итальянская UTOPIA [15], испытанная и используемая в некоторых городах Европы, RHODES [16]. SCATS и SCOOT применяются во всем мире, а другие системы реализуются только в некоторых городах и в основном для тестирования. Расширенный обзор локальных и сетевых стратегий управления представлен

в [17], где также предложена новая стратегия управления на основе мультиагентного подхода. Рассмотрим проблему интеграции системы управления дорожным движением и системы маршрутного ориентирования и навигации.

Одной из интересных концепций взаимодействия системы управления дорожным движением и системы маршрутного ориентирования и навигации является концепция «обратного давления» (также известная как «максимальное давление», «максимальный вес», «максимальная производительность», «максимальный перепад отставания») [18]. Полагая, что пользователи направляются из пункта отправления в пункт назначения посредством радиосети, предполагается, что в любом узле сети, представленной в виде ориентированного графа, клиенты могут войти на сервер и получить маршрут движения. Существует проблема контроля оптимальной пропускной способности, и кроме того, состояние сети должно быть стабильным. Контроль «обратного давления», как правило, состоит из набора контроллеров, каждый из которых относится к узлу в сети. Перекресток может управляться контроллером «обратного давления», который оптимизирует свою работу по минимизации параметров дорожного движения в соответствии с заданными алгоритмами. Это подчеркивает децентрализованный подход к управлению. Типичный алгоритм «обратного давления» представляет собой разницу между транспортной нагрузкой, идущей к перекрестку и выходящей с перекрестка. Другой подход предлагается в [19, 20], где рассматривается только транспортный поток, ведущий к перекрестку.

Алгоритм «обратного давления» обеспечивает максимальную пропускную способность каждого узла и сети в целом при интеграции системы управления дорожным движением и системы маршрутного ориентирования и навигации. И хотя алгоритм «обратного давления» применяется для управления работой светофоров [21–23], однако он практически не использовался для системы контроля инцидентов и маршрутного ориентирования.

Создание модели второго уровня управления

Предлагаемая модель второго уровня основана на реализации двух алгоритмов: поиска максимального объема движения в цикле при распределенном импульсе интенсивности и оп-

тимизации сдвигов при координированном регулировании.

Новизна алгоритма поиска максимального объема движения в цикле при распределенном импульсе интенсивности заключается в использовании для расчетов продолжительности цикла и разрешающего сигнала такого параметра, как импульс интенсивности, распределенный в цикле регулирования. А «плавающая» точка дает представление о сдвиге начала включения разрешающего сигнала не только в структуре цикла, но и по отношению к соседним регулируемым перекресткам, что позволяет моделировать приход «пачки» к ним и минимизацию потерь на магистрали. Импульс интенсивности видоизменяется на протяжении всей магистрали. На перегоне величина зеленого сигнала перекрестка, с которого стартовал поток, уже вторична, и необходимо рассматривать две такие величины, как ширина ленты времени для координированного регулирования и продолжительность разрешающего сигнала для перекрестка, к которому прибывает транспортный поток. Физически детектирование импульса интенсивности в каждом сечении возможно с использованием радар-детекторов, спутникового мониторинга. Возможно применение модели с установкой Bluetooth-детекторов.

Описываемый алгоритм предлагается использовать в автоматизированной системе управления дорожным движением (АСУДД) при координированном регулировании третьего поколения (управление в реальном масштабе времени). Функциями алгоритма оптимизации сдвигов являются анализ оптимальности сдвигов и модификация базового плана координации. Исходными данными служат: номер исходного (базового) плана координации; импульсы интенсивности по перегонам магистрали; номер дорожного контролера (ДК); время включения оптимизируемой фазы на этом ДК и номер ДК, относительно которого оптимизируется время включения фазы (входной ДК).

При работе в АСУДД алгоритм оптимизации сдвигов запускается непосредственно с автоматического рабочего места диспетчера. Оптимизации подвергается текущий план координации по объему потерь. Реализация алгоритма возможна только при наличии на периферийном уровне детекторов транспорта. Наибольшая эффективность достигается при установке детекторов транспорта в ключевых точках улично-дорожной сети с учетом транспортно-пешеходной нагрузки.

Реализация алгоритма оптимизации сдвигов при его применении на реальных объектах г. Минска (улицах Карбышева, Калиновского, Волгоградской) при изменении транспортной нагрузки по времени суток, дням недели, временам года позволила снизить величину потерь от задержек и остановок транспорта в среднем на 18 %. По результатам исследования рекомендовано использовать алгоритм оптимизации сдвигов в период опытной эксплуатации и при смене времен года для разработки карт времени и оптимизации планов координации в реальном масштабе времени с целью модификации базовых планов координированного управления.

Выделим события, влияющие на условия оптимизации:

- прогнозируемые события: статистически постоянно возникающие события (ежедневные параметры транспортных потоков при нормальных условиях и т. д.); не постоянно возникающие события (спортивные, культурно-массовые мероприятия и т. д.);
- внезапно возникающие события (инциденты): ДТП, затор, ремонтные работы, террористическая угроза на участке УДС, техногенное

происшествие на участке УДС, ухудшение погодных условий, помеха на проезжей части (пешеход, груз и т. д.), стихийное массовое мероприятие.

Каждый тип событий, влияющих на условия оптимизации, требует различных методов по мониторингу, идентификации, минимизации и устранению последствий (в случае возникновения инцидента).

В статье исследуются три различные структуры модели третьего уровня. Структура 1 трехуровневой модели, выбирающая маршрут на основе анализа коэффициентов загрузки полос, представлена на рис. 1.

Трехуровневая модель, выбирающая маршрут на основе анализа коэффициентов загрузки полос (структура 1), реализуется следующим образом: получение запроса от водителей о необходимости движения по маршруту $A-B$; расчет кратчайшего пути между точками A и B ; запрос на расчет времени сообщения по запрашиваемому маршруту; расчет времени циклов, задержек и коэффициентов загрузки полос для всех регулируемых перекрестков по маршруту $A-B$ (используя модель 1); проверка коэффициентов

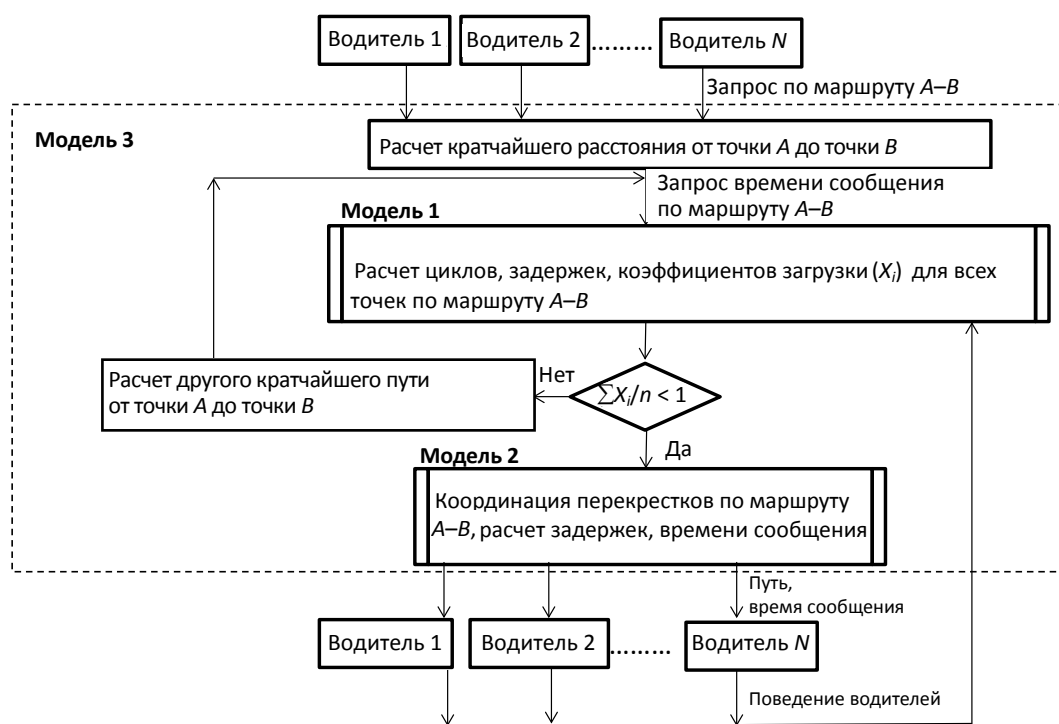


Рис. 1. Структура 1 трехуровневой модели, выбирающая маршрут на основе анализа коэффициентов загрузки полос

Fig. 1. Structure 1 of three-level model selecting route on the basis of analysis of load lane ratio

загрузки полос на условие $\sum X_i/n < 1$, где $\sum X_i$ – суммарный коэффициент загрузки полос для рассматриваемого направления, n – количество полос рассматриваемого направления; координата регулируемых пересечений по маршруту $A-B$, расчет задержек, времени сообщения (используя модель 1); доведение до пользователей информации о рекомендуемом маршруте движения из точки A в точку B и времени сообщения при движении по маршруту; отслеживание поведения водителей на предмет их возможного движения не по рекомендуемому маршруту.

Для отслеживания запросов от водителей (пользователей) о маршрутах движения предлагается использовать специализированное навигационное программное обеспечение. Данное программное обеспечение позволит водителям получать информацию о дорожно-транспортной ситуации на улично-дорожной сети в реальном масштабе времени. Так, водители смогут иметь информацию об интенсивности движения, о задержках вследствие различных инцидентов, а также о времени сообщения по запрашиваемому маршруту. Данные, предоставляемые водителям, рассчитываются с помощью моделей первого и второго уровней на основании данных с детекторов транспорта.

Для обеспечения обратной связи между системой управления дорожным движением и водителем (пользователем) в программном обеспечении должна быть предусмотрена функция «выбор маршрута». Подобная функция уже существует во многих навигационных программных продуктах, таких как Navitel, iGo и др. Однако данная информация не поступает в систему управления дорожным движением, и в этом коренное отличие существующей и предлагаемой функции программного обеспечения. При поступлении в систему управления движением информации о запрашиваемом пользователем маршруте система с помощью моделей первого, второго и третьего уровней доводит информацию до пользователя и отслеживает их реальное перемещение.

Одной из необходимых для решения является задача технического обеспечения для отслеживания маршрутов движения водителей (пользователей). В настоящее время такая возможность существует, однако повсеместно по-

ка не используется. В качестве решения данной задачи могут быть использованы: gsm-информации от операторов связи, gprs-данные, Глонасс-данные, Bluetooth-данные или специализированные RFID-метки. Техническое решение задачи лежит в плоскости выбора оператора системы управления дорожным движением. Предлагается в рамках реализации предложенной трехуровневой модели использовать gprs-данные от бортовых данных навигационных устройств или смартфонов пользователей.

Структура 2 трехуровневой модели, рассматривающей все возможные маршруты следования, представлена на рис. 2.

Трехуровневая модель для возможных маршрутов следования (вариант 2) реализуется следующим образом: получение запроса от водителей о необходимости движения по маршруту $A-B$; расчет расстояний для максимально возможного количества маршрутов из точки A в точку B ; запрос времени сообщения для максимально возможного количества маршрутов из точки A в точку B ; расчет времени цикла, задержек и коэффициентов загрузки полос для максимально возможного количества маршрутов из точки A в точку B (используем для расчетов модель 1); моделирование координации и расчет задержек и времени сообщения для максимально возможного количества маршрутов из точки A в точку B (используем для расчетов модель 2); выбор маршрута с минимальным значением показателя задержек; доведение до пользователей информации о рекомендуемом маршруте из точки A в точку B и времени сообщения при движении по маршруту; отслеживание поведения водителей на предмет их возможного движения не по рекомендуемому маршруту.

Структура 2 является идеальной для поиска оптимального маршрута, однако его полная реализация не представляется возможной. Поэтому предлагается ограничить количество рассматриваемых маршрутов с кратчайшим расстоянием от точки A до точки B до 3–6. Структура 3 модели для расчета 3–6 кратчайших маршрутов и выбора из них оптимального на условиях минимального значения задержек представлена на рис. 3. В статье рассматриваются результаты от сравнения трехуровневой модели для структур 1 и 3.

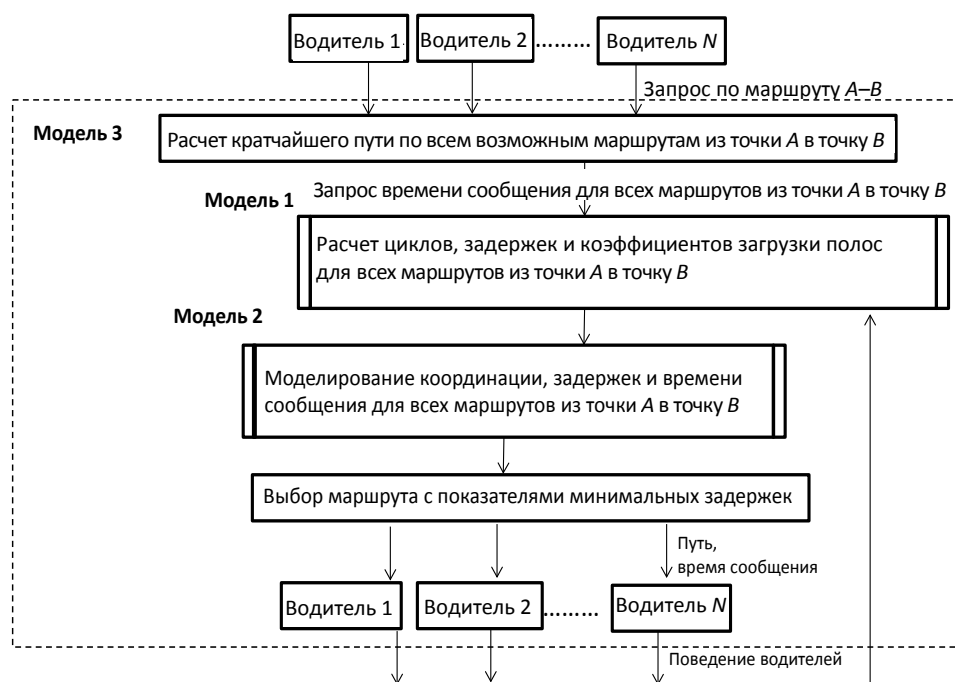


Рис. 2. Структура 2 трехуровневой модели, рассматривающей все возможные маршруты следования

Fig. 2. Structure 2 of three-level model considering all the possible routes

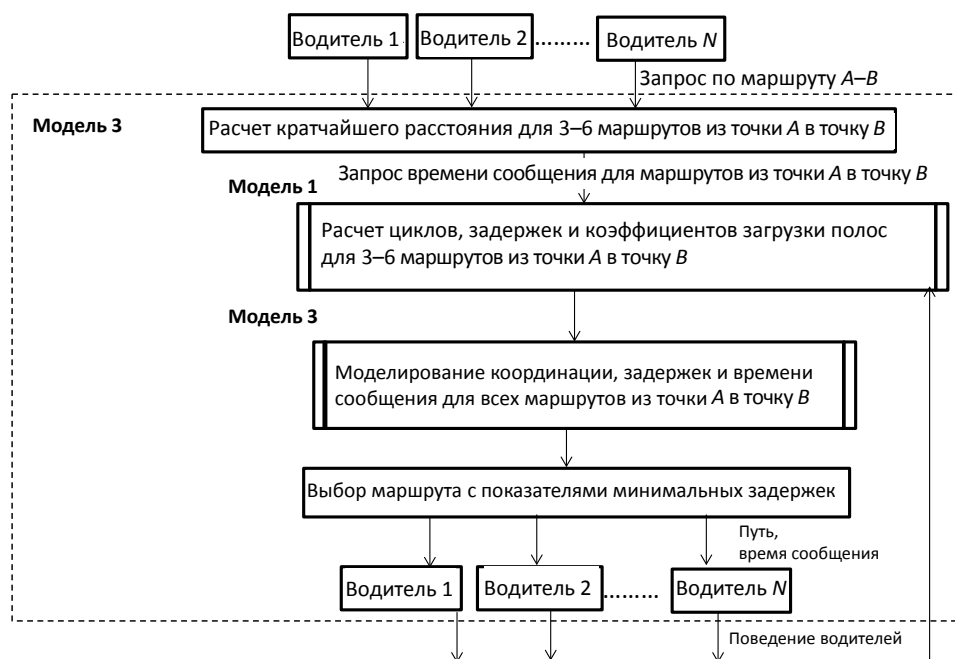


Рис. 3. Структура 3 трехуровневой модели для 3-6 кратчайших маршрутов

Fig. 3. Structure 3 of three-level model for 3-6 shortest routes

Экспериментальное исследование условий движения

Для проведения экспериментов воспользуемся САПР «Магистральное регулирование» и «Локальное регулирование» разработки ОАО «Агат». САПР позволяют моделировать

работу светофорных объектов на локальном и магистральном уровнях. Расчет сетевого уровня проводился с помощью САПР «Магистральное регулирование» путем наложения параметров магистралей. САПР позволяет рассчитывать задержки, коэффициенты загрузки

полос и время сообщения. Исследование проводилось на улично-дорожной сети г. Минска в микрорайоне Брилевичи (допущения: на улично-дорожной сети установлены динамические информационные табло (ДИТ), информирующие о текущей дорожно-транспортной ситуации; у водителей (пользователей) имеется специализированное программное обеспечение, позволяющее проинформировать систему управления дорожным движением в рамках реализации трехуровневой модели о маршрутах следования; в транспортных средствах есть бортовые устройства, позволяющие отслеживать их маршрут).

Сценарий, когда водителю (пользователю) необходимо попасть из точки P1 в точку P7, однако на участке P5–P6 произошло дорожно-транспортное происшествие, которое заблокировало планируемое движение водителя по маршруту P1–P2–P3–P5–P6–P7, представлен на рис. 4.

Длина маршрута P1–P2–P3–P5–P6–P7 – 2300 м. При нормальных условиях (без инцидента) время сообщения от точки P1 до точки P7 составляет 4 мин. Время сообщения от точки P1 до точки P7 по маршруту P1–P2–P3–P4–P7 – 5 мин, длина маршрута – 2400 м. Предположим, что ДИТ установлено за 200 м до перекрестков P3 и P8. При средней скорости движения 50 км/ч вероятность выполнения требований ДИТ составляет 60 % (рис. 5).

При возникновении ДТП на участке P5–P6 модель рассчитывает загрузку улично-дорож-

ной сети и время сообщения между точками P1 и P7. В случае, если время сообщения по маршруту P1–P2–P3–P5–P6–P7 больше времени сообщения по маршруту P1–P2–P3–P4–P7, информация об изменении рекомендуемого маршрута доводится до пользователей (водителей) с помощью ДИТ и специализированного программного обеспечения, установленного в смартфонах или бортовых навигационных устройствах автомобилей. На рис. 4 представлен выбор маршрута для сценария с ДТП с использованием кратчайшего пути (маршрут 1).

Модель 1 и модель 2 рассчитывают время цикла, задержки, время сообщения, коэффициент загрузки полос и синхронизируют (координируют) время включения разрешающего сигнала по маршруту P1–P2–P3–P4–P7. Если водители продолжают двигаться по маршруту P1–P2–P3–P5–P6–P7, количество транспортных средств в сегменте P5–P6 увеличивается, длина очереди превышает 300 м, светофорный объект в точке P3 начинает регулировать транспортный поток таким образом, чтобы не допустить движение транспорта в район сегмента P5–P6, как показано на рис. 6. Однако в направлении сегмента P5–P6 выделяется минимальное время фазы, при этом пользователи повсеместно с помощью вышеуказанных устройств информируются о ДТП в сегменте P5–P6.

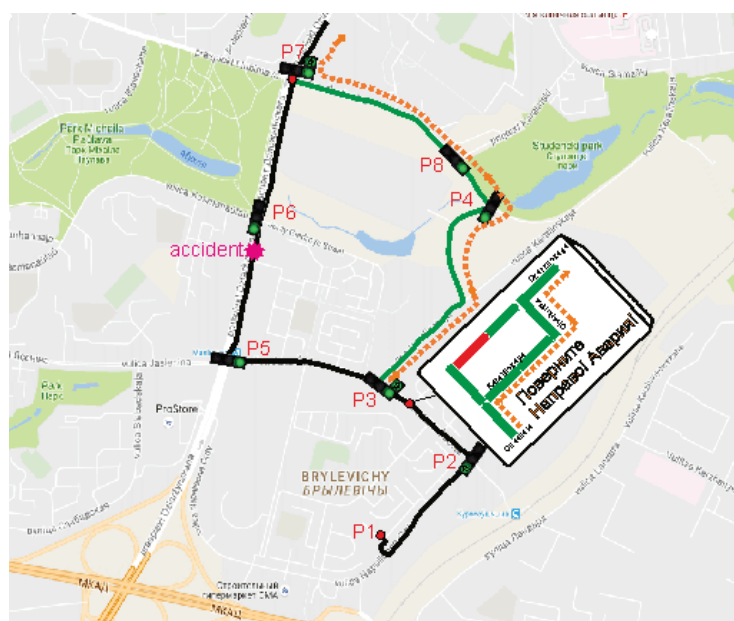


Рис. 4. Сценарий с дорожно-транспортным происшествием и использованием водителем кратчайшего пути (маршрут 1)

Fig. 4. Scenario with road traffic accident and usage of shortest route by driver (Route 1)

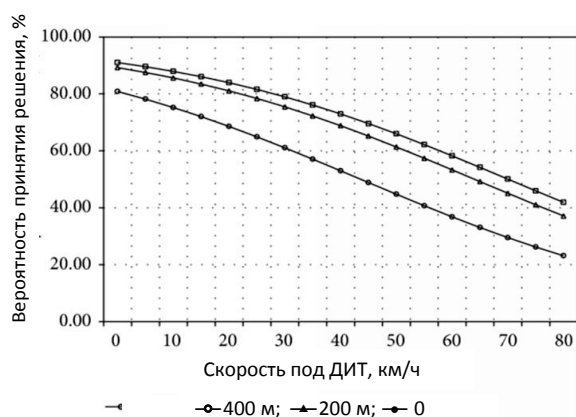


Рис. 5. Вероятность выполнения рекомендаций динамического информационного табло, основанная на логической регрессионной модели

Fig. 5. Probability in fulfillment of recommendations for dynamic information board which is based on logic regression model

В соответствии с алгоритмом трехуровневой модели для структуры 1 при перераспределении транспортных потоков по рекомендуемому маршруту интенсивность транспорта по маршруту P1–P2–P3–P4–P7 увеличится, что приведет к необходимости корректировки ра-

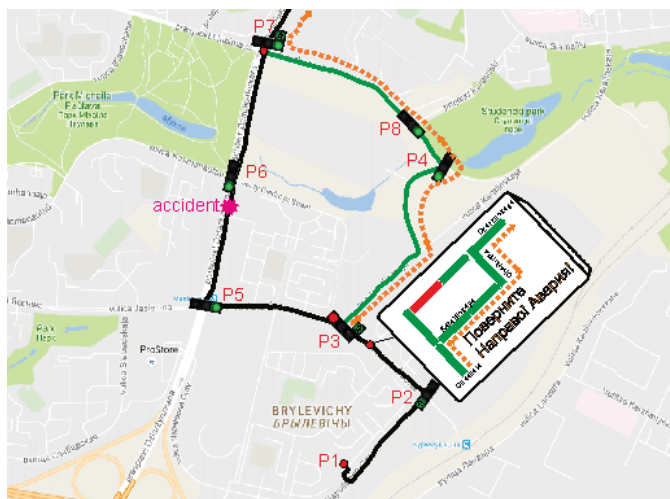


Рис. 6. Пример выбора маршрута для сценария с дорожно-транспортным происшествием при управлении в узле P3 (маршрут 1)

Fig. 6. Example of route selection for scenario with road traffic accident while driving at junction point P3 (Route 1)

боты светофоров по рассматриваемому маршруту. В случае, когда величина коэффициента загрузки полос достигнет единицы ($\sum X_i/n = 1$), модель (система) должна предоставить водителям другой маршрут. Пример предоставления альтернативного маршрута для структуры 1 трехуровневой модели представлен на рис. 7 (маршрут 2).

В случае, если коэффициенты загрузки полос $\sum X_i/n = 1$ и время сообщения по маршрутам P1–P2–P3–P5–P6–P7 и P1–P2–P3–P4–P7 превышает время сообщения, прогнозируемое системой по маршруту P1–P2–P3–P4–P8–P9–P10–P7, а именно 9 мин, система перенаправляет транспортный поток по маршруту P1–P2–P3–P4–P8–P9–P10–P7 и отображает на информационных табло, смартфонах, навигационных системах соответствующую информацию. При уменьшении X_i по маршруту P1–P2–P3–P4–P7 и появлении возможности проезда по нему за время, менее 9 мин, трехуровневая модель предложит пользователям этот маршрут. Операция повторяется постоянно, пока существует ДТП.

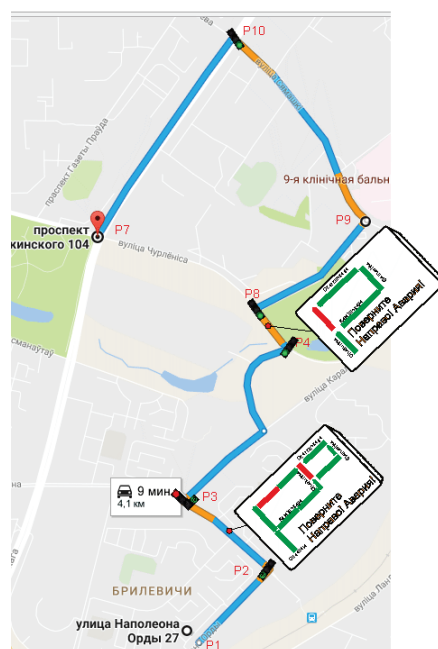


Рис. 7. Пример предоставления альтернативного маршрута для структуры 1 трехуровневой модели (маршрут 2)

Fig. 7. Example of alternative route provision for structure 1 of three-level model (Route 2)

Помимо данных от датчиков, находящихся на улично-дорожной сети, в трехуровневую модель также поступают данные от n количества пользователей, которые хотят из точки P1 попасть в точку P7. Модель анализирует текущую ситуацию с загрузкой улично-дорожной сети и сравнивает ее с количеством поступивших запросов в течение времени t . Причем время t рекомендуется принимать в пределах 15 мин, так как именно за этот период ситуация на улично-дорожной сети может измениться.

Допустим, модель получила информацию-запрос от n пользователей (водителей) на кратчайший путь из точки P1 в точку P7. При этом количество n такое, что $\sum X_i/n \geq 1$, где $\sum X_i$ – суммарная загрузка полосы по одному из направлений по маршруту P1–P7. Тогда трехуровневая модель показывает, что улично-дорожная сеть не загружена по определенным направлениям по маршруту P1–P7 только пользователями (водителями), которые отправили запрос до момента наступления при их движении условия $\sum X_i \geq 1$. Те же пользователи (водители), отправившие запрос после определения, что $\sum X_i \geq 1$, будут направлены системой по тому маршруту, в котором время сообщения минимально с учетом имеющихся параметров $\sum X_i$.

Для исследования эффективности работы структуры 3 трехуровневой модели предложен еще один альтернативный маршрут 3, показанный на рис. 8.



Рис. 8. Пример использования маршрута 3 для изучения структуры 3 трехуровневой модели

Fig. 8. Example of route usage for studying structure 3 of three-level model (Route 3)

Результаты эксперимента

При сравнении вариантов маршрутов для структур 1 и 3 трехуровневой модели проводилось исследование для двух структур трехуровневой модели (структуры 1 и 3) на трех вариантах маршрутов. Для каждого маршрута в САПР «Магистральное регулирование» интенсивность движения транспорта изменялась на 100 ед./ч для входного перекрестка в точке P2 и увеличивалась на 60 % на других перекрестках маршрутов. Результаты экспериментов представлены на рис. 9–11.

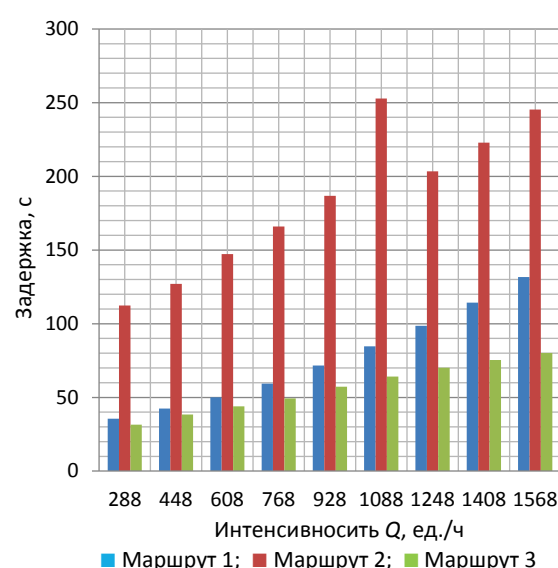


Рис. 9. Суммарные задержки по маршрутам в зависимости от интенсивности движения

Fig. 9. Total route delays according to road traffic intensity

Как видно из рис. 9, минимальные задержки достигаются при использовании водителями (пользователями) маршрута 3. Минимальное время сообщения достигается при использовании маршрута 1 (рис. 10).

Минимальное значение коэффициента загрузки полос достигается при использовании маршрута 3. Данные результаты показывают, что структура 1 трехуровневой модели дает худшие результаты по времени сообщения, однако лучшие по уровню задержек и коэффициентам загрузки полос. Структура 3 трехуровневой модели показывает наилучшие результаты по времени сообщения и худшие по сравнению со структурой 1 по уровню задержек и коэффи-

циентам загрузки полос. С точки зрения пользователей (водителей), им необходимо добраться из точки Р1 в точку Р7 за кратчайшее время, и структура модели 3 данную функцию реализовывает. Однако, с точки зрения системы управления дорожным движением, нужно учитывать уровень задержек на всей улично-дорожной сети и предлагать пользователям (водителям) оптимальный, с точки зрения задержек, маршрут. Возникает конфликт интересов между пользователем и системой управления дорожным движением.

Предлагается использовать структуру 1 трехуровневой модели, которая минимизирует задержки и коэффициент загрузки полос на исследуемых маршрутах. Результаты исследования

могли бы быть другими, если бы водители (пользователи) на 100 % доверяли информации, предоставляемой системой. Дальнейшие исследования должны быть направлены на интеграцию и координацию стратегий управления. Установка ДИТ и использование специализированного программного обеспечения требуют дополнительного изучения. Также целесообразно протестировать модель в реальных условиях и на более разветвленной сети с большим количеством возможных сценариев. Основной интерес вызывает поведение водителей в случае доведения до них информации о маршрутах, соответствующих минимальным параметрам задержек, но при этом имеющих неоптимальные параметры по времени сообщения.

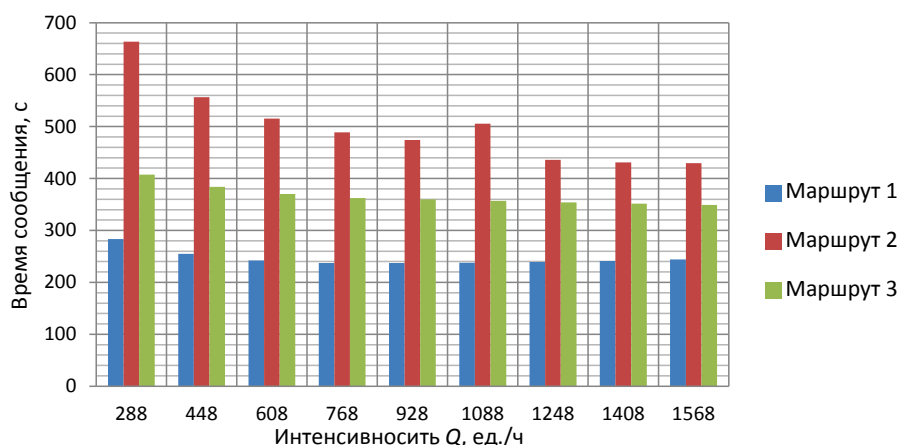


Рис. 10. Время сообщения по маршрутам в зависимости от интенсивности движения

Fig. 10. Route transportation time according to road traffic intensity

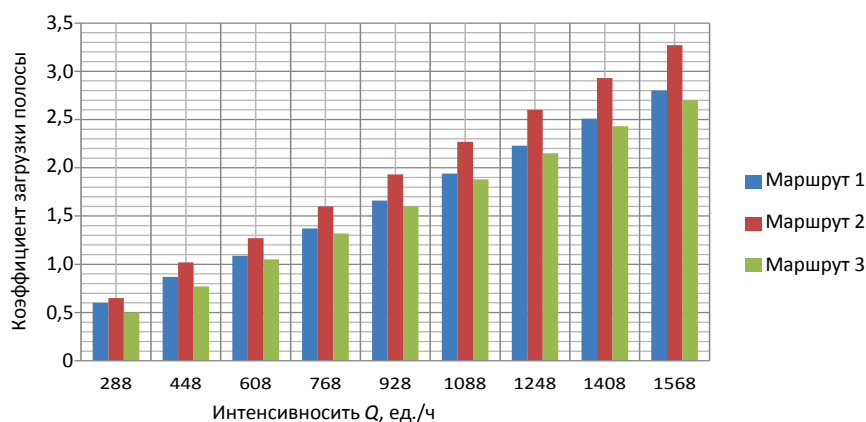


Рис. 11. Коэффициент загрузки полосы по маршрутам в зависимости от интенсивности движения

Fig. 11. Route load lane ratio according to road traffic intensity

ВЫВОДЫ

1. Предложена модель для минимизации потерь в дорожном движении при интеграции подсистемы контроля инцидентов и маршрутного ориентирования и автоматизированной системы управления дорожным движением в составе интеллектуальной транспортной системы Минска, которая исследована в качестве инструмента для моделирования САПР «Магистральное управление». Инновация первой ее составляющей состоит в том, что аналогичные «нечеткие» модели реализуются на основе алгоритма местного гибкого регулирования, в работе предложен алгоритм реализации по параметрам интенсивностей в зависимости от времени суток, дней недели. В результате моделирования выявлено, что наиболее эффективным параметром является показатель задержек. Но он не удовлетворяет водителей, которые стремятся выбирать маршруты с учетом минимальной скорости сообщения. Однако, с точки зрения управления интеллектуальной транспортной системой в целом, необходимо выбирать параметры исходя из требований минимизации задержек на улично-дорожной сети.

2. Алгоритм оптимизации сдвигов при координированном регулировании реализован в действующей автоматизированной системе управления дорожным движением Минска и при реализации в составе второй компоненты позволит увеличить эффективность управления на магистральной улично-дорожной сети на 10–15 %. Таким образом, наибольшую эффективность показала модель, основанная на минимизации задержек. С точки зрения интеллектуальной транспортной системы, данный параметр является одним из ключевых, однако по-прежнему остаются не изученными вопросы поведения водителей при доведении до них информации о маршрутах движения, приводящих к минимизации задержек, но не минимизирующих время движения по конкретно заданному водителем маршруту.

ЛИТЕРАТУРА

1. Review of Road Traffic Control Strategies / M. Papageorgiou [et al.]. Proceedings of the IEEE, 2003. Vol. 91, Iss. 12. P. 2043–2067. <https://doi.org/10.1109/jproc.2003.819610>.
2. Врубель, Ю. А. Определение потерь в дорожном движении / Ю. А. Врубель, Д. В. Капский, Е. Н. Кот. Минск: БНТУ, 2006. 240 с.
3. Координированное управление дорожным движением / Ю. А. Врубель [и др.]. Минск: БНТУ, 2011. 230 с.
4. Капский, Д. В. Совершенствование применения периферийных устройств при модернизации АСУ дорож-

- ным движением / Д. В. Капский, Д. В. Рожанский, Д. В. Навой // Безпека дорожнього руху України. 2006. № 1–2. С. 112–120.
5. Капский, Д. Рекомендации по разработке режимов светофорного регулирования на пешеходных переходах / Д. Капский, Е. Кот // Transport and Telecommunication. 2006. Т. 7, № 3. С. 496–503.
6. Капский, Д. В. Проведение исследований интенсивности движения транспортных потоков: теория и эксперимент / Д. В. Капский, Д. В. Рожанский, Д. В. Мозалевский // Безпека дорожнього руху України. 2006. Т. 23, № 3–4. С. 35–40.
7. Мочалов, В. В. Влияние на безопасность движения автомобильных телематических систем / В. В. Мочалов, А. Я. Андреев, Д. В. Капский // Вместе к эффективному дорожному движению: сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 28–31 окт. 2008 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: А. С. Калиниченко [и др.]. Минск, 2008. С. 136–145.
8. Discrete Choice Methods and their Applications to Short Term Travel Decisions / M. Ben-Akiva, M. Bierlaire, R. W. Hall (ed.) // Handbook of Transportation Science. International Series in Operations Research & Management Science. 1999. Vol. 23. P. 5–33. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5203-1_2/
9. A Modified Logit Route Choice Model Overcoming Path Overlapping Problems: Specification and Some Calibration Results for Interurban Networks / E. Cascetta [et al.] // Proceedings of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory. France: Lyon, 1996. P. 697–711.
10. Robertson, D. I. TRANSYT: a Traffic Network Study Tool: Road Research Laboratory Report LR 253 / D. I. Robertson. Crowthorne, Berkshire, 1969.
11. Lowrie, P. R. SCATS – Principles, Methodology and Algorithms / P. R. Lowrie // Proceedings of the International Conference on Road Traffic Signalling. United Kingdom: London, 1982. P. 67–70.
12. SCOOT – a Traffic Responsive Method of Co-ordinating Signals / P. B. Hunt [et al.]: TRRL Report 1014. Crowthorne, Berkshire, England, 1981. 44 p.
13. Gartner, N. H. OPAC: a Demand-Responsive Strategy for Traffic Signal Control / N. H. Gartner // Transportation Research Record 906. 1983. P. 75–81.
14. Henry, J. J. PROLYN / J. J. Henry, J. L. Farges // Proceedings of the 6th IFAC/IFIP/IFORS Symposium on Control, Computers, Communications in Transportation. France: Paris, 1989. P. 253–255. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-037025-5.50043-8>.
15. Di Taranto, C. UTOPIA / C. Di Taranto, V. Mauro // Proceedings of the 6th IFAC/IFIP/IFORS Symposium on Control, Computers, Communications in Transportation. France, Paris, 1989. P. 245–252. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-037025-5.50042-6>.
16. Head, K. L. Hierarchical Framework for Real-Time Traffic Control / K. L. Head, P. B. Mirchandani, D. Sheppard // Transportation Research Record 1360. 1992. P. 82–88.
17. Van Katwijk, R. T. Multi-Agent Look-Ahead Traffic-Adaptive Control. / R. T. Van Katwijk. Netherlands, Delft: Delft University of Technology, 2008. 173 p.
18. Tassiulas, L. Stability Properties of Constrained Queueing Systems and Scheduling Policies for Maximum Throughput in Multihop Radio Networks / L. Tassiulas, A. Ephremides // IEEE Transactions on Automatic Control. 1992. Vol. 37, Iss. 12. P. 1936–1948. <https://doi.org/10.1109/9.182479>.

19. Smith, M. J. A Local Traffic Control Policy Which Automatically Maximises the Overall Travel Capacity of an Urban Road Network / M. J. Smith // *Traffic Engineering + Control*. 1980. Vol. 21, No 6. P. 298–302.
20. Smith, M. J. Traffic Signal Control and Route Choice: a New Assignment and Control Model Which Designs Signal Timings / M. J. Smith // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2015. Vol. 58. P. 451–473. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.02.002>.
21. Varaiya, P. A Universal Feedback Control Policy for Arbitrary Networks of Signalized Intersections / P. Varaiya // EECS, UC Berkeley. 2009.
22. Varaiya, P. Max Pressure Control of a Network of Signalized Intersections / P. Varaiya // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2013. Vol. 36. P. 177–195. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.08.014>.
23. Distributed Traffic Signal Control for Maximum Network Throughput / T. Wongpiromsarn [et al.] // *15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, IEEE. 2012. P. 588–595. <https://doi.org/10.1109/itsc.2012.6338817>.

Поступила 05.03.2018

Подписана в печать 14.05.2018

Опубликована онлайн 28.09.2018

REFERENCES

1. Papageorgiou M., Kiakaki C., Dinopoulou V., Kotsialos A., Wang Yibing/ Review of Road Traffic Control Strategies / M. Papageorgiou [et al.]. *Proceedings of the IEEE*, 2003. 91 (12) P. 2043–2067. <https://doi.org/10.1109/jproc.2003.819610>.
2. Vrubel' Yu. A., Kapsky D. V., Kot E. N. (2006) *Determination of losses in Road Traffic*. Minsk, Belarusian National Technical University. 240 (in Russian).
3. Vrubel' Yu. A., Kapskii D. V., Rozhanskii D. V., Navoi D. V., Kot E. N. (2011) *Coordinated Control of Road Traffic*. Minsk, Belarusian National Technical University. 230 (in Russian).
4. Kapsky D. V., Rozhansky D. V., Navoy D. V. (2006) Improvement in Application of Peripheral Devices while Modernizing Automatic Control Systems for Road Traffic. *Bezpeka Dorozhniogo Rukhu Ukrainy* [Traffic Safety in Ukraine], (1–2), 112–120 (in Russian).
5. Kapsky D., Kot E. (2006) Recommendations on Development of Traffic Signalization Modes at Pedestrian Crossings. *Transport and Telecommunication*, (7) 3, 496–503 (in Russian)
6. Kapsky D. V., Rozhansky D. V., Mozalevsky D. V. (2006) Study of Traffic Flow Intensity: Theory and Experiment. *Bezpeka Dorozhniogo Rukhu Ukrainy* [Traffic Safety in Ukraine], 23 (3–4), 35–40 (in Russian).
7. Mochalov V. V., Andreev A. Ya., Kapsky D. V. (2008) Influence of Automotive Telematics System Movement on Safety. *Vmeste k Effektivnomu Dorozhnomu Dvizheniyu: Sb. Nauch. St. Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., Minsk, 28–31 Okt. 2008 g.* [Together to Efficient Road Traffic: Collection of Scientific Papers. International Scientific and Practical Conference, Minsk, October 28–31, 2008]. Minsk, Belarusian National Technical University, 136–145 (in Russian).
8. Ben-Akiva M., Bierlaire M., Hall R. W. (1999) Discrete Choice Methods and their Applications to Short Term Travel Decisions. *Handbook of Transportation Science. International Series in Operations Research & Management Science*, 5–33. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5203-1_2.
9. Cascetta E., Nuzzolo A., Russo F., Vitetta A. (1996) A Modified Logit Route Choice Model Overcoming Path Overlapping Problems: Specification and Some Calibration Results for Interurban Networks. *Proceedings of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*. France, Lyon, 697–711.
10. Robertson D. I. (1969) TRANSYT: a Traffic Network Study Tool. Road Research Laboratory Report LR 253. Crowthorne, Berkshire.
11. Lowrie P. R. (1982) SCATS – Principles, Methodology and Algorithms. *Proceedings of the International Conference on Road Traffic Signalling*. United Kingdom, London, 67–70.
12. Hunt P. B., Robertson D. I., Bretherton R. D., Winton R. I. (1981) *SCOOT – a Traffic Responsive Method of Coordinating Signals*. Report TRRL 1014 Transport and Road Research Laboratory. Crowthorne, Berkshire, England. 44.
13. Gartner N. H. (1983) OPAC: a Demand-Responsive Strategy for Traffic Signal Control. *Transportation Research Record*, (906), 75–81.
14. Henry J. J., Farges J. L. (1989) PROLYN. *Proceedings of the 6th IFAC/IFIP/IFORS Symposium on Control, Computers, Communications in Transportation*. France, Paris, 253–255. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-037025-5.50043-8>.
15. Di Taranto C., Mauro V. (1989) UTOPIA. *Proceedings of the 6th IFAC/IFIP/IFORS Symposium on Control, Computers, Communications in Transportation*. France, Paris, 245–252. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-037025-5.50042-6>.
16. Head K. L., Mirchandani P. B., Sheppard D. (1992) Hierarchical Framework for Real-Time Traffic Control. *Transportation Research Record*, (1360), 82–88.
17. Van Katwijk R. T. (2008) *Multi-Agent Look-Ahead Traffic-Adaptive Control*. Netherlands, Delft, Delft University of Technology. 173.
18. Tassioulas L., Ephremides A. (1992) Stability Properties of Constrained Queueing Systems and Scheduling Policies for Maximum Throughput in Multihop Radio Networks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 37 (12), 1936–1948. <https://doi.org/10.1109/9.182479>.
19. Smith M. J. (1980) A Local Traffic Control Policy Which Automatically Maximises the Overall Travel Capacity of an Urban Road Network. *Traffic Engineering + Control*, 21 (6), 298–302.
20. Smith M. J. (2015) Traffic Signal Control and Route Choice: a New Assignment and Control Model Which Designs Signal Timings. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 58, 451–473. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.02.002>.
21. Varaiya P. (2009) *A Universal Feedback Control Policy for Arbitrary Networks of Signalized Intersections*. EECS, UC Berkeley.
22. Varaiya P. (2013) Max Pressure Control of a Network of Signalized Intersections. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, (36), 177–195. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.08.014>.
23. Wongpiromsarn T., Uthacharoenpong T., Yu Wang, Frazzoli E., Danwei Wang (2012) Distributed Traffic Signal Control for Maximum Network Throughput. *15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, 588–595. <https://doi.org/10.1109/itsc.2012.6338817>.

Received: 05.03.2018

Accepted: 14.05.2018

Published online: 28.09.2018

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-413-420>

UDC 621.874-83

Optimization of Bridge Crane Movement Control

V. S. Loveikin¹⁾, Y. A. Romasevich¹⁾

¹⁾National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Kiev, Ukraine)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Abstract. Transient modes of bridge cranes movement determine their energy, dynamic and electrical performance, as well as productivity and durability of work. An optimal control problem of its movement has been solved while making an analysis of indicators for efficient performance of a bridge crane. Terminal and integral criteria have been selected as optimization criteria. They represent undesirable dynamic properties of the crane. Legendre method has been used to determine the possibility for achieving minimum of the optimization criterion. An analysis of the Euler-Poisson equation, which is a necessary condition for the minimum of the integral criterion, has shown that it is impossible to find a solution for the optimization problem in an analytical form. A method of differential evolution has been used in order to find an approximate solution to the optimization problem. The approximate (suboptimal) solution has been found in the complex domain, which is a limited domain conjunction of dynamic parameters and phase coordinates of the system. Limitation in the domain of the system phase coordinates (a polynomial basis function has been used in the paper) provides the possibility to attain absolute minimums of terminal problem criteria. A simulation of the bridge crane motion has been carried out in order to establish an efficiency for implementation of the suboptimal control. During this process dynamic mechanical characteristics of its electric drive have been taken into account. While carrying out the simulation, a frequency and an amplitude of the electric drive voltage in the crane movement mechanism have been changed (frequency scalar method for speed changing of an asynchronous electric drive has been used). A comparative analysis of the dynamic, kinematic, electrical and energy performance indicators of the bridge crane under suboptimal and S-curved (standard) laws of frequency and voltage variations in the crane electric drive has made it possible to establish an improvement in the efficiency of its operation under suboptimal control.

Keywords: bridge crane, optimal control, integral and terminal criteria, simulation, oscillations, dynamic loads, differential evolution

For citation: Loveikin V. S., Romasevich Y. A. (2018) Optimization of Bridge Crane Movement Control. *Science and Technique*. 17 (5), 413–420. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-413-420> (in Russian)

Оптимизация управления движением мостового крана

Докт. техн. наук, проф. В. С. Ловейкин¹⁾, докт. техн. наук, доц. Ю. А. Ромасевич¹⁾

¹⁾Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины (Киев, Украина)

Реферат. Переходные режимы движения мостовых кранов определяют их энергетические, динамические и электрические показатели, а также производительность и долговечность работы. На основе анализа показателей эффективности работы мостового крана решена задача оптимального управления его передвижением. В качестве критериев оптимизации выбраны терминальные и интегральный критерии, отображающие нежелательные динамические свойства крана. С помощью метода Лежандра установлена возможность достижения минимума интегрального критерия. Анализ уравнения Эйлера – Пуассона, которое является необходимым условием минимума интегрального критерия, показал, что аналитическое нахождение решения оптимизационной задачи невозможно. Для нахождения приближенного решения оптимизационной задачи использован метод дифференциальной эволюции. Приближенное (субопти-

Адрес для переписки

Ромасевич Юрий Александрович
Национальный университет биоресурсов
и природопользования Украины
ул. Героев Обороны, 12,
03041, г. Киев, Украина
Тел.: +380 44 527-87-34
romasevichyuriy@ukr.net

Address for correspondence

Romasevich Yuriy A.
National University of Life
and Environmental Sciences of Ukraine
12 Geroev Oborony str.,
03041, Kiev, Ukraine
Tel.: +380 44 527-87-34
romasevichyuriy@ukr.net

мальное) решение было найдено в комплексной области, которая является конъюнкцией ограниченных областей динамических параметров и фазовых координат системы. Ограничение области фазовых координат системы (в статье использована полиномиальная базисная функция) дало возможность достичь абсолютных минимумов терминальных критериев задачи. Для установления эффективности реализации субоптимального управления проведено моделирование движения мостового крана с учетом динамической механической характеристики его электропривода. В процессе моделирования изменению подвергались частота и амплитуда питающего напряжения электропривода механизма передвижения крана (использован частотный скалярный метод изменения скорости асинхронного электропривода). Сравнительный анализ динамических, кинематических, электрических и энергетических показателей работы мостового крана при субоптимальном и S -образном (стандартном) законах изменения частоты и напряжения питания электропривода крана дал возможность установить улучшение эффективности его работы при субоптимальном управлении.

Ключевые слова: мостовой кран, оптимальное управление, интегральный и терминальный критерии, моделирование, колебания, динамические нагрузки, дифференциальная эволюция

Для цитирования: Ловейкин, В. С. Оптимизация управления движением мостового крана / В. С. Ловейкин, Ю. А. Ромасевич // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 5. С. 413–420. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-413-420>

Introduction

Bridge cranes are used in many processing of the state-of-the-art technology. The efficiency of crane operation has an impact on the productivity process of production. In order to state the ways of increasing crane effectiveness, the study of crane process has to be done.

In the first scientific researches of bridge cranes dynamics the simple models of the systems and external forces were used [1–4]. The two- and three-mass models have been used. The drive force was assumed constant. The results of these works allowed calculate dynamical loads with analytical expressions at a first approximation. In the works [5–8] assumed that drive force is a function of time or speed of a system drive. The compilation of the models allowed find an analytical expressions for dynamical loads calculation.

The new approaches to dynamic loads calculation comprise the dynamic mechanical characteristic of the system's drive [7, 9], non-linear effects [10–15] etc.

The problems of rationalization of the bridge crane movement were studied in the works [16, 17]. Another approach to increase bridge crane efficiency is to obtain the optimal law of its movement. One of the major conditions that have been met in many works is to eliminate cargo oscillations. The major factor in such approach is optimization criterion. Minimization of transition regimes duration [18–25] is attended by increasing of dynamical loads. The integral criterion which includes dynamical and energetic functions [9, 26, 27] allows to increase productivity, reliability and energy effi-

ciency. Because of a system processing depends on the external forces and system parameters [28, 29], the solution of optimization problems if crane dynamics has to be found in domains of movement regimes and system parameters.

In spite of rigorous research in the area of crane dynamics and its optimal control, the unsolved scientific problems still remain: 1) optimization of the bridge crane regimes has done only in relation to one criterion (time, energy, force etc.). This problem statement is limited; 2) the implementation of the optimal laws of crane motion with frequency-controlled drive did not study properly; 3) the capability of using a particular techniques in optimization problems has been studied improperly; 4) the analysis of the solved optimal problem, carried out upon not all indications and so on.

For this reason the goal of the article is to obtain optimal movement regime of the bridge crane and its dynamic parameters, which allows to increase the efficiency processing of the crane upon such indications: productivity, reliability, energy efficiency, etc. In order to achieve the goal the following tasks, it is necessary to solve next issues: 1) to state an optimization regime's problem for bridge crane; 2) to find the solution of the stated problem; 3) to carry out a comparison study of the obtained results and to estimate the effect of the optimization.

Main part. In order to provide a research we have chosen a dynamics model of the bridge crane and the scheme of its asynchronous drive (fig. 1) [9, 17].

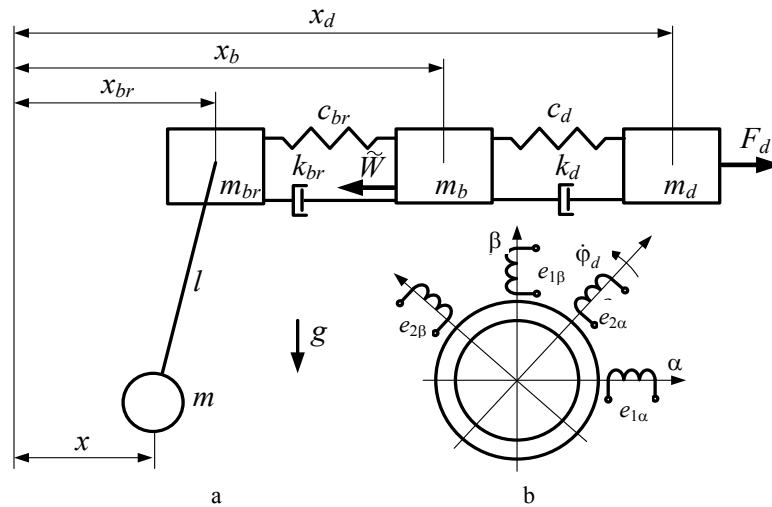


Fig. 1. Four-mass dynamics model of the bridge crane (a) and scheme of the bridge crane asynchronous drive (b):

$\tilde{W}$ – variable resistance of the bridge crane movement; l – length of flexible suspension of a cargo; g – acceleration of gravity; x, x_b, x_{br}, x_d – generalized coordinates of the cargo, an end beams, the crane bridge and the drive respectively; m, m_b, m_{br}, m_d – reduced masses of the cargo, the end beams, the crane bridge and the drive respectively; c_{br}, c_d – reduced coefficients of stiffness of the crane bridge and the transmission respectively; k_{br}, k_d – reduced dissipation factor of the crane bridge and the transmission respectively; F_d – drive force which is reduced to forward movement (it depends on electromagnetic torque of the crane drive); $u_{1\alpha}, u_{1\beta}$ – generalized

vector projections of voltage stator to coordinate axes α and β $\left(u_{1\alpha} = U_{\max} \cos \left(2\pi \int_0^t f dt \right), \left(u_{1\beta} = U_{\max} \sin \left(2\pi \int_0^t f dt \right) \right) \right)$;

$U_{\max}$ – phase voltage amplitude of the drive; f – frequency of drive voltage; $e_{2\beta}, e_{2\alpha}$ – EMF, which was inducing by flux linkage of rotor to axes α and β respectively; $(e_{2\alpha} = p\omega_{\text{жб}}(L_2 i_{2\beta} + L_{12} i_{1\beta}) + i_{2\alpha} R_2)$, $e_{2\beta} = p\omega_{\text{жб}}(L_2 i_{2\alpha} + L_{12} i_{1\alpha}) + i_{2\beta} R_2$); p – number of the crane electric drive pairs of poles; R_1 – active resistance of the stator winding; R_2 – reduced to the stator active resistance of the rotor winding; δ – dispersion coefficient ($\delta = 1 - (1 + X_1(2\pi/L_{12})^{-1})(1 + X_2(2\pi/L_{12})^{-1})^{-1}$); X_1 – inductive reactance of the stator winding; X_2 – reduced to the stator inductive reactance of the rotor winding; L_1, L_2 – inductance of the stator and the rotor windings respectively; L_{12} – coefficient of the mutual induction; k_r, k_s – magnetic coupling ratio of the rotor and the stator respectively ($k_r = L_{12} L_2^{-1}$; $k_s = L_{12} L_1^{-1}$); $\omega_{\text{жб}}$ – angular speed of the drive; $i_{1\alpha}, i_{1\beta}$ and $i_{2\alpha}, i_{2\beta}$ – projections of generalized vector of current of the stator and rotor to coordinates axes α and β

Mathematical model of the crane is the system of the non-linear homogeneous differential equations of second order:

$$\begin{cases} \frac{di_{1\alpha}}{dt} = \frac{1}{\delta L_1} (u_{1\alpha} - i_{1\alpha} R_1 + k_r e_{2\alpha}); \\ \frac{di_{1\beta}}{dt} = \frac{1}{\delta L_1} (u_{1\beta} - i_{1\beta} R_1 - k_r e_{2\beta}); \\ \frac{di_{2\alpha}}{dt} = -\frac{1}{\delta L_2} ((u_{1\alpha} - i_{1\alpha} R_1) k_s + e_{2\alpha}); \\ \frac{di_{2\beta}}{dt} = -\frac{1}{\delta L_2} ((u_{1\beta} - i_{1\beta} R_1) k_s - e_{2\beta}); \\ 3pL_{12}(i_{1\beta} i_{2\alpha} - i_{1\alpha} i_{2\beta}) \frac{u\eta_{dr}}{r_w} = m_d \frac{d^2 x_d}{dt^2} + c_d(x_d - x_b) + k_d \left(\frac{dx_d}{dt} - \frac{dx_b}{dt} \right); \\ m_b \frac{d^2 x_b}{dt^2} = c_d(x_d - x_b) + k_d \left(\frac{dx_d}{dt} - \frac{dx_b}{dt} \right) - c_b(x_b - x_{br}) - k_b \left(\frac{dx_b}{dt} - \frac{dx_{br}}{dt} \right) - \tilde{W}; \\ m_{br} \frac{d^2 x_{br}}{dt^2} = c_b(x_b - x_{br}) + k_b \left(\frac{dx_b}{dt} - \frac{dx_{br}}{dt} \right) - \frac{mg}{l} (x_{br} - x); \\ \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{g}{l} (x_{br} - x), \end{cases} \quad (1)$$

where u – gear ratio of the drive; η_{dr} – efficiency of the transmission; r_w – radius of a wheel of the crane movement mechanism. Variable resistance of the bridge crane movement $\tilde{W}$ determined as follow:

$$\tilde{W} = \begin{cases} c_d x_d + k_d \frac{dx_d}{dt}, & \text{if } c_d x_d + k_d \frac{dx_d}{dt} < (0,012 \dots 0,02)(m_b + m_{br} + m)g; \\ (0,012 \dots 0,02)(m_k + m_m + m_b)g, & \text{if } c_d x_d + k_d \frac{dx_d}{dt} \geq (0,012 \dots 0,02)(m_b + m_{br} + m)g. \end{cases} \quad (2)$$

The chosen mathematical model includes mechanical and electrical values. Thus, in the research we took into account complicate electrical-mechanical processes and its interinfluence.

One of the ways to increase a crane operation is to optimize its transition regimes of motion and its parameters. In the framework of this study a complex (terminal-integral) criterion has been chosen, which can be presented as follows:

$$Cr = Ter + Int = \left(\delta_1^{Ter} F_d^2(0) + \delta_2^{Ter} F_d^2(T) \right)^{0,5} = \left(T^{-1} \int_0^T (\delta_1^{Int} F_d^2 + \delta_2^{Int} R_d^2 + \delta_3^{Int} R_{br}^2 + \delta_4^{Int} \Omega_0^4 m^2 \Delta x^2) dt \right)^{0,5} \rightarrow \min, \quad (3)$$

where *Ter* and *Int* – terminal and integral parts of complex criteria *Cr* respectively; *T* – duration of the transition process (acceleration or deceleration of a crane); *R_{br}* and *R_d* – dynamical loads in the

crane bridge and the drive (transmission) respectively; Δx – lack of perpendicularity of the cargo, which determines low-frequency dynamic loads in the crane bridge; Ω_0 – free frequency of a load on a flexible suspension; δ_1^{Ter} and δ_2^{Ter} – weight coefficients for terminal part of *Cr*; δ_1^{Int} , δ_2^{Int} , δ_3^{Int} and δ_4^{Int} – weight coefficients for integral part of *Cr*. Weight coefficients for both parts of criterion (2) are dimensionless, their sum is equal to one. The values of weight coefficients stated the importance of respective factors, i. e. how important to decrease one or the other factor.

Minimization of criterion *Cr* (2) allows to increase life duration of the crane elements (bridge, couplings, gears, shafts etc.), crane's productivity and energy efficiency.

Without consideration of electromagnetic transition processes in the crane drive and dissipation of the energy in mechanical elements, the criterion *Cr* (2) could be presented in the following form:

$$Cr = \left(\delta_1^{Ter} \left(\tilde{W}(0) + \sum_{u=1}^4 A_u \frac{d^{2u}x}{dt^{2u}}(0) \right)^2 + \delta_2^{Ter} \left(\tilde{W}(T) + \sum_{h=1}^4 A_h \frac{d^{2h}x}{dt^{2h}}(T) \right)^2 \right)^{0,5} = \left(T^{-1} \int_0^T \left(\delta_1^{Int} \times \left(\tilde{W} + \sum_{i=1}^4 A_i \frac{d^{2i}x}{dt^{2i}} \right)^2 + \delta_2^{Int} \left(\tilde{W} + \sum_{j=1}^3 B_j \frac{d^{2j}x}{dt^{2j}} \right) + \delta_3^{Int} \left(\sum_{q=1}^2 C_q \frac{d^{2q}x}{dt^{2q}} \right)^2 + \delta_4^{Int} m^2 \left(\frac{d^2x}{dt^2} \right)^2 \right) dt \right)^{0,5} \rightarrow \min, \quad (4)$$

where *A_i*, *B_j*, *C_q* – coefficients, which are determined by the following expressions:

$$\begin{aligned} A_1 &= m + m_{br} + m_b + m_d; \\ A_2 &= \frac{(m_{br} + m)(m_d + m_b)}{c_{br}} + \frac{m_d(m_{br} + m + m_b)}{c_d} + (m_{br} + m_b + m_d)\Omega_0^{-2}; \\ A_3 &= \frac{(m_{br} + m)m_d m_b}{c_d c_{br}} + \left(\frac{m_d(m_{br} + m_b)}{c_d} + \frac{m_{br}(m_d + m_b)}{c_{br}} \right) \Omega_0^{-2}; \\ A_4 &= \frac{m_{br} m_d m_b}{c_d c_{br}} \Omega_0^{-2}; \quad B_1 = m + m_{br} + m_b; \\ B_2 &= (m_{br} + m_b)\Omega_0^{-2} + \frac{m_b}{c_{br}}(m_{br} + m); \quad B_3 = \frac{m_b m_{br}}{c_{br}} \Omega_0^{-2}; \\ C_1 &= m + m_{br}; \quad C_2 = m_{br} \Omega_0^{-2}. \end{aligned}$$

The boundary conditions for the reduced masses are followed:

$$\left\{ \begin{array}{l} x(0) = \frac{dx}{dt}(0) = 0; \\ x_{br}(0) = \frac{dx_{br}}{dt}(0) = 0; \\ x_b(0) = \frac{dx_b}{dt}(0) = 0; \\ x_d(0) = \frac{dx_d}{dt}(0) = 0 \\ \\ x(T) = s; \quad \frac{dx}{dt}(T) = v; \\ x(T) - x_{br}(T) = x_{br}(T) - x_b(T) = x_b(T) - x_d(T) = 0; \\ \frac{dx}{dt}(T) - \frac{dx_{br}}{dt}(T) = \frac{dx_{br}}{dt}(T) - \frac{dx_b}{dt}(T) = \frac{dx_b}{dt}(T) - \frac{dx_d}{dt}(T) = 0, \end{array} \right. \quad (5)$$

Boundary conditions (5) could be rewritten in following form:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^i x}{dt^i}(0) = 0, \quad i = \overline{(0, 7)}; \\ x(T) = s, \quad \frac{dx}{dt}(T) = v, \quad \frac{d^j x}{dt^j}(T) = 0, \quad j = \overline{(2, 7)}. \end{array} \right. \quad (6)$$

Note, that augmentation to boundary conditions (6) extra conditions:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^8 x}{dt^8}(0) = 0; \\ \frac{d^8 x}{dt^8}(T) = 0 \end{array} \right. \quad (7)$$

could allow hitting the global minimum of the terminal criteria Ter (3).

The study of the integral criterion Int with Legendre condition [30] shows that it could be minimized. Indeed, the strong of the Legendre condition occurs:

$$\frac{\partial^2 I}{\partial \left(\frac{d^8 x}{dt^8} \right)^2} = 2\delta_1^{Int} A_4^2 > 0, \quad (8)$$

where I – integrand of the functional Int .

The first part of the expression (2) does not cause a significant effect. So, during optimal control problem solving, let us assume $\tilde{W}$ is constant and equal to $0,015(m_b + m_{br} + m)g$. This assumption greatly simplifies the solving of the problem.

Let us try to use the variation calculus [30] to find solution to the problem. For this purpose it is

necessary to obtain the extremum necessary criterion of the Cr – the Euler-Poisson equation. It could be presented as follow:

$$L(x) = \sum_{z=0}^n (-1)^z \frac{d^z}{dt^z} \frac{\partial I}{\partial x} = 0, \quad (8)$$

where L – differential functional, which forms the Euler-Poisson equation. The expanded form of the expression (8) has the following form:

$$L(x) = \sum_{z=2}^8 D_z \frac{d^{2z} x}{dt^{2z}} = 0, \quad (9)$$

where D_z – coefficients, which are depend on already known coefficients A_i , B_j and C_q .

In order to solve differential equation to find the auxiliary equation is necessary:

$$\sum_{z=2}^8 D_z r^{2z} = 0. \quad (10)$$

Taking out a factor r^4 and substituting r^2 to y we obtain the next equation:

$$y^2 \sum_{z=0}^6 D_{z+2} y^z = 0. \quad (11)$$

It is impossible to find the solution of the sixth-degree algebraic equation. Consequently, to find the solution of the optimal control problem is also impossible. It may be shown; that analytical solution could not be found with Pontryagin's maximum principle or dynamic programming method neither.

Hence, we could use an approximate approach. In order to find the approximate solution of the problem let use direct variation method [31]. The basis function is a polynomial of the n -th order:

$$\tilde{\alpha} = \sum_{b=0}^{17} G_b t^b + \sum_{e=18}^n G_e t^e, \quad (12)$$

where G_e – unknown coefficients; n – the highest degree of among extra members of the polynomial, which will be used in order to minimize integral criterion Int .

The unknown coefficients G_b must be found in such a way that function (12) met boundary conditions:

$$\begin{cases} \frac{d^i \tilde{\alpha}}{dt^i}(0) = 0, \quad i = \overline{(0, 8)}; \\ \tilde{\alpha}(T) = s, \quad \frac{d\tilde{\alpha}}{dt}(T) = v, \quad \frac{d^j \tilde{\alpha}}{dt^j}(T) = 0, \quad j = \overline{(2, 8)}. \end{cases} \quad (13)$$

So, the polynomial expression (12) is the function of $n-18$ unknown coefficients G_e . We can find the expression:

$$\begin{aligned} & \left(T^{-1} \int_0^T \left(\delta_1^{Int} \left(\tilde{W} + \sum_{i=1}^4 A_i \frac{d^{2i} \tilde{\alpha}}{dt^{2i}} \right)^2 + \right. \right. \\ & + \delta_2^{Int} \left(\tilde{W} + \sum_{j=1}^3 B_j \frac{d^{2j} \tilde{\alpha}}{dt^{2j}} \right) + \delta_3^{Int} \left(\sum_{q=1}^2 C_q \frac{d^{2q} \tilde{\alpha}}{dt^{2q}} \right) + \\ & \left. \left. + \delta_4^{Int} m^2 \left(\frac{d^2 \tilde{\alpha}}{dt^2} \right)^2 \right) dt \right)^{0.5} = f(G_e, A_i, B_j, C_q, s, T). \end{aligned} \quad (14)$$

Note, the system parameters m_d, m_b, m_{br}, m are unchangeable (based on meeting of the crane design conditions). Parameters T, v could be changed, but they were defined by the technological conditions of the crane processing. Accept that, they are unchangeable. Parameters c_{br}, l are changeable but only in limited domains. We might obtain the values of c_{br}, l , in their limited domains such, that expression (14) attains the minimum. The same is true for regime parameter s .

In order to minimize the expression (14) the stated optimal control problem has been reduced to the linear programming problem [32]:

$$\begin{aligned} & f(G_e, c_d, l, s) \rightarrow \min; \\ & c_{d.min} \leq c_d \leq c_{d.max}; \\ & l_{min} \leq l \leq l_{max}, \end{aligned} \quad (15)$$

where $c_{d.min}$ and $c_{d.max}$ – lower and higher border of parameter c_d domain respectively; l_{min} and l_{max} – lower and higher border of parameter l domain respectively.

In the context of the used application n has been chosen equal to 5. It is the rational value –

the compromise between a computational compilation and an accuracy of problem solution.

The stated linear programming problem has been solved with the differential evolution method [33] for tabulated parameters (tabl. 1).

Table 1

Values of system parameters, which have been used in calculations

Parameter	Unit of measurement	Value
m_d	kg	$3,50 \cdot 10^3$
m_b		$2,05 \cdot 10^4$
m_{br}		$2,60 \cdot 10^4$
m		$2,00 \cdot 10^4$
T	s	$4,00 \cdot 10^0$
$P_{d.nom}$	Wt	$2 \times 1,50 \cdot 10^4$
l_{min}	m	$1,50 \cdot 10^0$
l_{max}		$8,00 \cdot 10^0$
v	m/s	$2,10 \cdot 10^0$
c_{br}	H/m	$6,90 \cdot 10^6$
$c_{d.min}$		$4,80 \cdot 10^6$
$c_{d.max}$		$1,92 \cdot 10^7$

The optimal value parameter c_d is the domain boundary $c_{d.min}$. The best values for parameters l and s are 2,15 m and 4,2 m respectively. In order to show the advantages of the obtained suboptimal regime of the bridge crane processing the comparative analysis have been carried out. The suboptimal regime of the crane movement was comparing with S-curve law of the crane motion. Such law took in comparing because it is standard curve in variable-frequency crane drive [34]. The comparing was carried out with indicators: maximum of load deflection angle φ_{max} during the crane movement; maximum of load deflection angle $\varphi_{max,T}$ after the crane stop; maximum of force in the crane bridge $R_{br,max}$; maximum of force in the crane transmission $R_{d,max}$; maximum of the crane drive torque $M_{d,max}$; root-mean-square force in the crane bridge $R_{br,RMS}$; root-mean-square force in the crane transmission $R_{d,RMS}$; root-mean-square of the crane drive torque $M_{d,RMS}$; relative maximum of the crane drive power $\tilde{P}_{max}$ (in fractions of nominal value); relative maximum of the crane drive current $\tilde{I}_{max}$ (in fractions of nominal value). The indicators that have been calculated for all cycle of motion “acceleration-steady movement-deceleration” are tabulated in tabl. 2.

Duration of the steady movement of the crane is equal to 3 s. Analysis of the tabl. 2 data shows that suboptimal control of the crane movement reduced root-mean-square forces and torques, but maximums of the dynamical loads slightly increased.

Table 2

Values of indicators

Indicators	Unit of measurement	Regime of motion		Reduction
		S-curved	Suboptimal	
$\varphi_{\max}$	grad	$1,10 \cdot 10^1$	$7,56 \cdot 10^0$	45,5 %
$\varphi_{\max.T}$		$1,10 \cdot 10^1$	$2,50 \cdot 10^{-1}$	44 times
$R_{br.\max}$	H	$4,67 \cdot 10^4$	$4,88 \cdot 10^4$	-4,3 %
$R_{d.\max}$		$1,49 \cdot 10^3$	$1,75 \cdot 10^3$	-14,8 %
$R_{br.RMS}$		$1,25 \cdot 10^4$	$1,06 \cdot 10^4$	17,9 %
$R_{d.RMS}$		$3,53 \cdot 10^2$	$3,36 \cdot 10^2$	5,1 %
$M_{d.\max}$	Hm	$9,77 \cdot 10^2$	$9,98 \cdot 10^2$	-2,1 %
$M_{d.RMS}$		$2,24 \cdot 10^2$	$2,16 \cdot 10^2$	3,7 %
$\bar{P}_{\max}$	—	$3,70 \cdot 10^0$	$3,52 \cdot 10^0$	5,1 %
$\bar{I}_{\max}$	—	$4,47 \cdot 10^0$	$3,91 \cdot 10^0$	14,3 %

The reason why root-mean-square forces and torques have decreased is the oscillation of the load on the flexible suspension became much lesser and dynamical loads, which have been caused by oscillation, have decreased. The residual oscillation (after the crane stop) of the cargo during suboptimal control practically non-exists. It allows to increase the crane productivity. Also, the intensity of cranes operator's work became much lesser.

In order to show quality of implementation, the curves have been plotted (fig. 2).

Gray curve on the fig 2 presents preset speed of the crane. Analysis of the curves shows that frequency-controlled crane drive able to implement the suboptimal law at high quality. Plots, which are presented in fig. 2, shows, that the determine factor of the crane working process is the shape of the acceleration and deceleration curves.

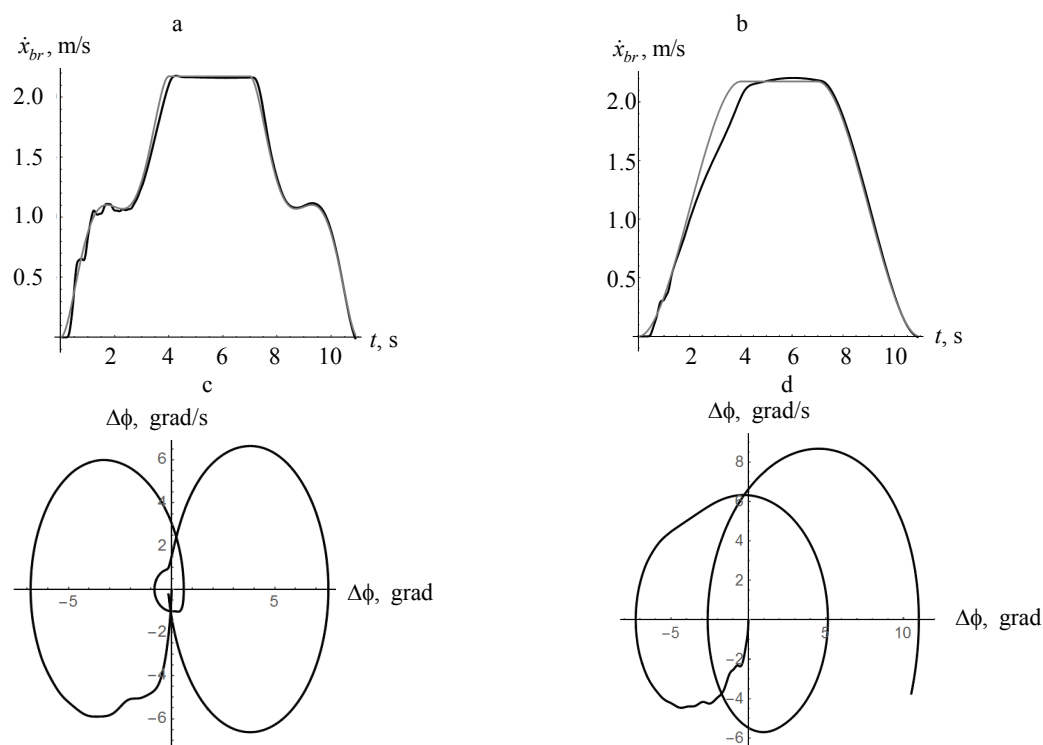


Fig. 2. Curves of crane speed during suboptimal (a) and S-curve (b) control; phase trajectory of the cargo oscillation during suboptimal (c) and S-curve (d) control

CONCLUSIONS

The major scientific results, obtained in the article are:

1) it is impossible to find the exact solution of the optimal control problem for four-mass dynamical model of the crane. An efficient method which reduces the optimal control problem to the linear programming problem is direct variational techniques. It is desirable to seek the solution of the problem in limited domains of phase coordinates and dynamical parameters of a system;

2) obtained in the work suboptimal control of the crane movement could be implemented with the frequency-controlled drive. The optimal values of the stiffness coefficients of the crane transmission and a length of flexible suspension might be used in improvement of crane processing;

3) one of the determine factor of the crane working process is the shape of the acceleration and deceleration curves. During suboptimal control of the crane movement root-mean-square forces and torques are decreasing, but maximum dynamic loads are increasing slightly.

REFERENCES

1. Komarov M. S. (1969) *Dynamics of Load-Lifting Machines*. Moscow, Mashynostroenye Publ. 206 (in Russian).
2. Kazak S. A. (1968) *Dynamics of Overhead Cranes*. Moscow, Mashynostroenye Publ. 331 (in Russian).
3. Gohberg M. M. (1969) *Metal Constructions of Hoisting-and-Transport Machines*. Moscow, Mashynostroenye Publ. 520 (in Russian).
4. Gaidamaka V. F. (1989) *Load-Lifting Machines*. Kiev, Vyscha Shkola Publ. 328 (in Russian).
5. Sheffler M., Dresyh Kh., Kurt F. (1981) *Load-Lifting Cranes. Book 2*. Moscow, Mashynostroenye Publ. 287 (in Russian).
6. Lobov N. A. (1987) *Dynamics of Load-Lifting Cranes*. Moscow, Mashynostroenye Publ. 160 (in Russian).
7. Budikov L. Ya. (1997) *Multiparametric Analysis of Overhead-Type Crane Dynamics*. Luhansk, Publishing house of East Ukrainian National University named after V. Dal. 210 (in Russian).
8. Loveikin V. S., Chovniuk Iu. V., Dikteruk M. H., Pastushenko S. I. (2004) *Simulation of Dynamics for Lifting Machine Mechanisms*. Kyiv-Mykolaiv, Mykolaiv National Agrarian University. 286 (in Ukrainian).
9. Loveikin V. S., Romasevych Yu. O. (2016) *Dynamics and Optimization of Overhead Crane Movement*. Kyiv, KOMPRINT Publ. 314 (in Ukrainian).
10. Blackburn D., Singhose W., Kitchen J., Patrangenu P., Lawrence J. (2009) Command Shaping for Nonlinear Crane Dynamics. *Journal of Vibration and Control*, 16 (4), 477–501. <https://doi.org/10.1177/1077546309106142>.
11. Naif B. Almutairi, Mohamed Zribi (2009) Sliding Mode Control of a Three-dimensional Overhead Crane. *Journal of Vibration and Control*, 15 (11). 1679–1730. <https://doi.org/10.1177/1077546309105095>.
12. Moustafa Kamal A. F., Ebeid A. M. (1998) Nonlinear Modeling and Control of Overhead Crane Load Sway. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 110 (3), 266–271. <https://doi.org/10.1115/1.3152680>.
13. Sun N., Fang Yo (2014) Non-Linear Tracking Control of Under-Actuated Cranes with Load Transferring and Lowering: Theory and Experimentation. *Automatica*, 50 (9), 2350–2357. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2014.07.023>.
14. Tuan L. A., Lee S., Dang V. H., Moon S., Kim B. S. (2013). Partial Feedback Linearization Control of Three-Dimensional Overhead Crane. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 11 (4), 718–727. <https://doi.org/10.1007/s12555-012-9305-z>.
15. Singhose W., Kim D., Kenison M. (2008) Input Shaping Control of Double-Pendulum Bridge Crane Oscillations. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 130 (3), 034504-1–034504-6. <https://doi.org/10.1115/1.2907363>.
16. Herasymyak R. P., Leshchev. V. A. (2008) *Analysis and Synthesis Crane Electro-Mechanical Systems*. Odessa, SMIL Publ. 192 (in Russian).
17. Budikov L. Ya. (1997) *Multi-Parametric Analysis of Overhead-Type Crane Dynamics*. Luhansk, Publishing House of East Ukrainian National University named after V. Dal. 210 (in Russian).
18. Grigorov O. V., Loveikin V. S. (1997) *Optimal Control of Hoisting Machine Movement*. Kiev, IZMN Publ. 264 (in Ukrainian).
19. Singhose W., Porter L., Kenison M., Krikkku E. (2000) Effects of Hoisting on Input Shaping Control of Gantry Cranes. *Control Engineering Practice*, 8 (10), 1159–1165. [https://doi.org/10.1016/s0967-0661\(00\)00054-x](https://doi.org/10.1016/s0967-0661(00)00054-x).
20. Dhanda A., Vaughan J., Singhose W. (2016) Vibration Reduction Using Near Time-Optimal Commands for Systems with Nonzero Initial Conditions. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 138 (4), 041006-1–041006-9. <https://doi.org/10.1115/1.4032064>.
21. Ermidoro M., Formentin S., Cologni A., Previdi F., Savaresi S. M. (2014) On Time-Optimal Anti-Sway Controller Design for Bridge Cranes. *American Control Conference (ACC)*. Portland, Oregon, USA. 2809–2814. <https://doi.org/10.1109/acc.2014.6858939>.
22. Hazriq I. J., Nursabillilah M. A., Mohamed Z., Selamat N. A., Abidin A. F. Z., Jamian J. J., Kassim A. M. (2013) Optimal Performance of Nonlinear Gantry Crane System via Priority-Based Fitness Scheme in Binary PSO Algorithm. *5th International Conference on Mechatronics (ICOM'13)*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 53. 012011. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/53/1/012011>.
23. Manson G. A. (2007) Time-Optimal Control of Overhead Crane Model. *Optimal Control Applications & Methods*, 3 (2), 115–120. <https://doi.org/10.1002/oca.4660030202>.
24. Solis C. U., Clempner J. B., Poznyak A. S. (2016) Designing Terminal Optimal Control with Integral Sliding Mode Component Using Saddle Point Method Approach: Cartesian 3D-Crane Application. *Nonlinear Dynamics*, 86 (2), 911–926. <https://doi.org/10.1007/s11071-016-2932-9>.
25. Smekhov A. A., Erofeev N. Y. (1975) *Optimal Control of Lifting and Transporting Machines*. Moscow, Mashynostroenye Publ. 239 (in Russian).
26. Loveikin V. S., Pochka K. I. (2017) Synthesis of Camshaft Driving Mechanism in Roller Molding Installation with Combined Motion Mode According to Acceleration of Third Order. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 16 (3), 206–214 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-3-206-214>.
27. Loveikin V. S., Chovniuk Yu. V., Liashko A. P. (2014) Crane Vibrating Systems Controlled by Mechatronic Devices with Magneto-Rheological Fluid: the Nonlinear Mathematical Model of Behavior and Optimization of Work Regimes. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu = Scientific Bulletin of National Mining University*, 6, 97–102 (in Russian).
28. Loveikin V. S., Nesterov A. P. (2002) *Dynamic Optimization of Hoisting Machines*, Kharkiv, KhDADTU. 285 (in Ukrainian).
29. Kyrychenko Y., Samusia V., Kyrychenko V. (2012) Software Development for the Automatic Control System of Deep-Water Hydro-Hoist. *Geomechanical Processes During Underground Mining*, 81–86. <https://doi.org/10.1201/b13157-14>.
30. Petrov Iu. P. (1977) *Variational Methods of Optimal Control Theory*, Leningrad, Energia Publ. 280 (in Russian).
31. Loveikin V. S., Romasevich Yu. O., Loveikin Yu. V. (2012) Analysis of Direct Variational Methods for Solving Optimal Control Problems. *Visnyk Natsionalnoho Universytetu "Lvivska Politehnika". Optymizatsiia Vyrobnnychkh Protseviv i Tekhnichnyi Kontrol u Mashynobuduvanni ta Pryladowbuduvanni* [Bulletin of the Lviv Polytechnic National University. Series: Optimization of Production Processes and Technical Control in Mechanical Engineering and Instrument Making], 729, 70–79 (in Ukrainian).
32. Bronshtein I. N., Semendyayev K. A., Musiol G., Mühlig H. (2015) *Handbook of Mathematics*. Springer. 799. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46221-8>.
33. Storn R., Kenneth P. (1995). *Differential Evolution – Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization over Continuous Spaces*. Technical Report TR-95-012. International Computer Science Institute. 15.
34. Mitsubishi Electric (2011) *FR-E700. Frequency Inverter Instruction Manual*. 524.

Received: 04.07.2017

Accepted: 10.10.2017

Published online: 28.09.2018

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-421-431>

УДК 629.03-52

Обратная связь в цепи управления автоматизированным сцеплением при трогании грузового автомобиля с места

Асп. Ле Ван Нгиа¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Представлено описание мехатронной системы управления механической трансмиссией 20-тонного грузового автомобиля, а также ее адаптивного алгоритма трогания с места, характер протекания переходного процесса которого существенно влияет на долговечность элементов автоматизированного силового агрегата, плавность движения и комфортность водителя при вождении. Ввиду того что мехатронная система управления силовым агрегатом, включающая дизельный двигатель, сухое фрикционное двухдисковое сцепление, основную механическую ступенчатую и дополнительную коробки передач, имеет помимо механических и пневматических также электрические компоненты, ее мультидисциплинарная модель разработана в программном пакете Imagine Lab AMESim. Данная модель позволяет обрабатывать комплексные алгоритмы управления и анализировать поведение интеллектуальных систем на ранних стадиях проектирования. Исследование выполнено на базе испытательного комплекса кафедры «Автомобили» автотракторного факультета Белорусского национального технического университета. Результаты исследования подтверждают адекватность разработанной мультидисциплинарной модели. С целью прецизионного управления фрикционным сцеплением введена обратная связь по приращению разности угловых скоростей ведущей и ведомой частей фрикционного сцепления. На основании разработанной компьютерной модели определены пороговые значения параметра обратной связи, используемые для программирования микропроцессорного блока при реализации адаптивного алгоритма трогания грузового автомобиля с места.

Ключевые слова: мехатронная система, алгоритм управления, пороговые значения, грузовой автомобиль, автоматизированная трансмиссия, фрикционное сцепление, обратная связь, моделирование, полунатурный эксперимент, AMESim

Для цитирования: Нгиа, Ле Ван. Обратная связь в цепи управления автоматизированным сцеплением при трогании грузового автомобиля с места / Ле Ван Нгиа // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 5. С. 421–431. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-421-431>

Feedback in Automated Clutch Control Circuit for Truck Start-Up Process

Le Van Nghia¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract: The paper presents description of a mechatronic control system for mechanical transmission of a 20-ton truck, as well as its adaptive start-up algorithm, transient process behavior which significantly affects durability of automated power unit elements, vehicle movement smoothness and driver's comfort when driving. A multidisciplinary model of the mechatronic control system has been developed in the software package Imagine Lab AMESim because its power unit including a diesel engine, a dry frictional two-disc clutch, a main mechanical stepped gearbox and an additional gearbox has electrical components besides mechanical and pneumatic ones. The given model allows to test complex control algorithms and analyze the behavior of intelligent systems in the early designing stages. The research has been carried out on the basis of the test complex at Department "Automobiles", Automotive and Tractor Faculty, Belarusian National Technical University. Research results confirm an adequacy of the AMESim developed multidisciplinary model. Feedback on the increment

Адрес для переписки

Нгиа Ле Ван
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-82-05
nghiaminsk@gmail.com

Address for correspondence

Nghia Le Van
Belarusian National Technical University
12 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-82-05
nghiaminsk@gmail.com

of an angular velocity difference between driving and driven parts of the friction clutch has been introduced for precise friction clutch control. Threshold values of a feedback parameter have been determined on the basis of the developed computer model and these values will be used for programming a microprocessor unit when implementing an adaptive algorithm for a truck start-up process

Keywords: mechatronic system, control algorithm, threshold values, truck, automated transmission, friction clutch, feedback, simulation, semi-natural experiment, AMESim

For citation: Nghia Le Van. (2018) Feedback in Automated Clutch Control Circuit for Truck Start-Up Process. *Science and Technique*. 17 (5), 421–431. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-421-431> (in Russian)

Введение

Исследование автоматизированной мехатронной системы управления силовым агрегатом (АМСУСА) проводится, потому что разработка перспективной, надежной АМСУСА для автомобилестроения остается нерешенной проблемой. Ведущие автомобилестроительные концерны и специализированные фирмы США и Евросоюза, такие как Eaton (Auto/Ultra Shift и Ultra Shift Plus transmissions), ZF (AS-Tronic), Volvo (Geartronic, I-shift), Scania (Opticruise), Mercedes (Telligent Gearshift Automated), усиленно работают над созданием и совершенствованием АМСУСА нового поколения с модульной структурой систем автоматики для грузового автомобильного транспорта, автобусов и автопоездов. Одним из наиболее трудоемких этапов при проектировании мехатронной системы данного класса является разработка и отладка адаптивного алгоритма по прецизионному управлению сухим фрикционным сцеплением при трогании с места. Для улучшения качества переходного процесса в цепь управления сцеплением целесообразно ввести обратную связь по разности оборотов ведомой и ведущей частей. Численные значения указанного параметра могут быть определены методом имитационного моделирования переходного процесса на ЭВМ путем прямого перебора с заданным шагом. Однако классический метод построения модели с разработкой расчетной динамической схемы и математического описания в данном случае неприемлем, ввиду наличия специфических исполнительных механизмов, пневматических и электрических компонентов мехатронной системы, имеющих задержки по времени срабатывания и другие специфические особенности. Поэтому исследование технического объекта целесообразно проводить на базе платформы мультидисциплинарного моделирования Imagine Lab AMESim, позволяющей обрабатывать комплексные алгоритмы управления и

предсказывать поведение интеллектуальных систем на ранних стадиях проектирования.

Основная часть

В качестве объекта изучения был выбран грузовой автомобиль КамАЗ-5320 полной массой 20 т, силовой агрегат которого оснащен мехатронной системой управления. Принципиальная схема спроектированной автоматизированной трансмиссии, установленной на испытательном комплексе кафедры «Автомобили» БНТУ, представлена на рис. 1. Комплекс включает: автоматизированный силовой агрегат, маховую массу, порошковый электромагнитный тормоз, пневматическую питающую часть и информационно-управляющую систему. Силовой агрегат состоит из: дизельного двигателя КамАЗ-740.01, сухого двухдискового фрикционного сцепления и 10-ступенчатой коробки передач (КП) КамАЗ-14 с повышающим делителем. Основу программно-аппаратной платформы мехатронной системы составляют смарт-контроллеры ecomat R360 [1] серии CR2500 (Ifm electronic, Германия), объединенные в локальную электронную сеть посредством CAN-шины с возможностью обмена информацией по протоколу SAE J1939.

При необходимости установки нейтрали в процессе движения водитель переводит селектор режимов в положение «N» (нейтраль). CAN-модуль 2 получает сгенерированный цифровой сигнал, преобразовывает его в CAN-сообщение и передает информацию о текущем положении селектора по соответствующей CAN-шине смарт-контроллеру 4 (рис. 1). После отработки временной задержки, необходимой для подтверждения инициализации выбранного водителем режима (неизменное положение рукоятки селектора в позиции «N»), ЭБУ 4 подает сигнал на электромагнитный клапан. Исполнительный механизм 17 срабатывает, и фрикционное сцепление выключается.

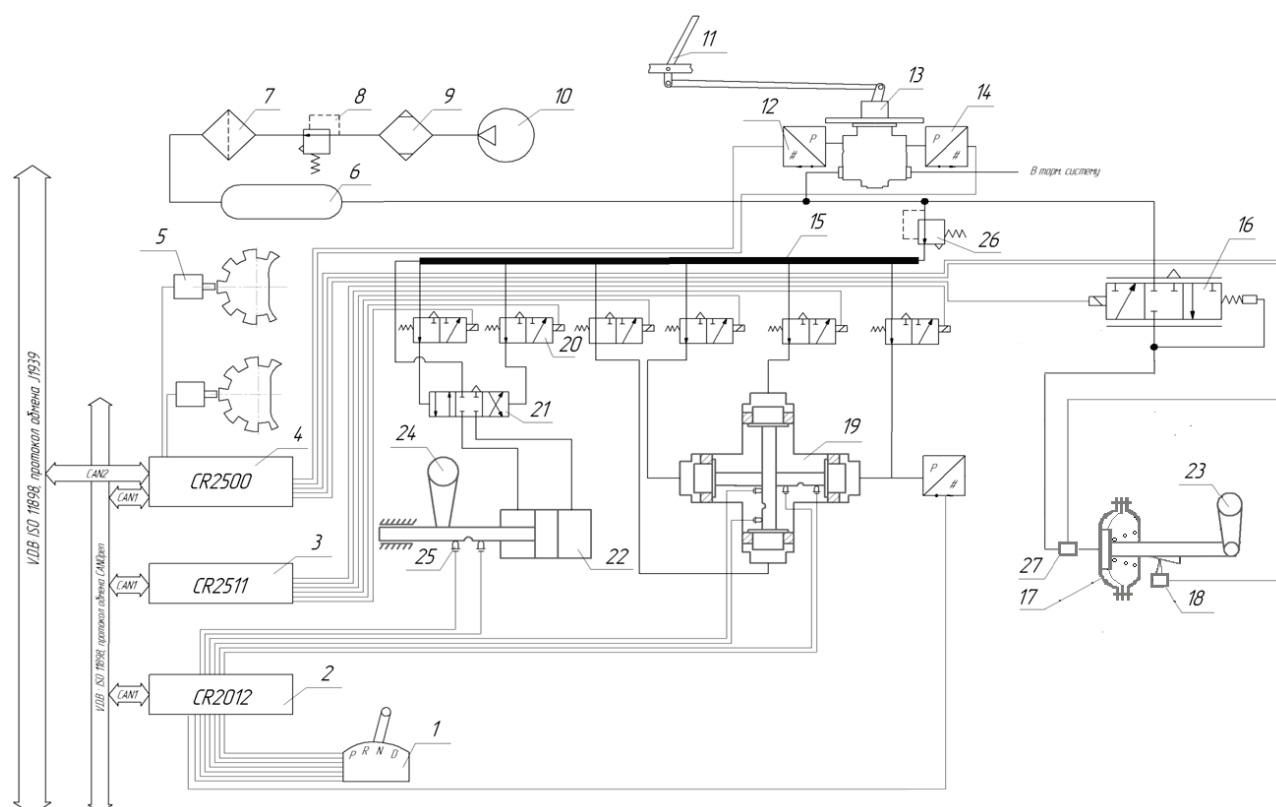


Рис. 1. Принципиальная схема мехатронной системы управления автоматизированной трансмиссией грузового автомобиля: 1 – селектор режимов; 2,3 – CAN-модуль ввода и вывода; 4 – смарт-контроллер; 5 – датчик частоты вращения; 6 – ресивер; 7 – фильтр; 8 – регулятор давления; 9 – влагомаслоотделитель; 10 – компрессор; 11 – тормозная педаль; 12 – цифровой датчик давления; 13 – тормозной кран; 14 – конечной выключатель; 15 – рампа клапанов пневматическая; 16 – пропорциональный электромагнитный клапан; 17 – пневмокамера; 18 – датчик перемещения штока; 19 – исполнительный механизм коробки передач; 20 – электромагнитный клапан; 21 – золотниковый пневмораспределитель; 22 – исполнительный механизм делителя; 23 – рычаг выключения сцепления; 24 – рычаг привода делителя; 25 – концевик положения штока пневмоцилиндра; 26 – регулятор давления; 27 – датчик давления

Fig. 1. Schematic diagram of mechatronic control system for truck automated transmission:

- 1 – mode selector; 2 – CAN input module; 3 – CAN output module; 4 – smart controller; 5 – rotational speed sensors; 6 – receiver; 7 – filter; 8 – pressure regulator; 9 – oil separator; 10 – compressor; 11 – brake pedal; 12 – digital pressure sensor; 13 – brake valve; 14 – limit switch; 15 – valve pneumatic ramp; 16 – proportional solenoid valve; 17 – pneumatic chamber; 18 – rod movement sensor; 19 – gearbox actuator; 20 – solenoid operated valve; 21 – air-control valve; 22 – splitter actuator; 23 – clutch control rod; 24 – splitter rod lever; 25 – limit switch of pneumatic cylinder rod; 26 – pressure regulator; 27 – pressure sensor

Параллельно по второй CAN-шине (протокол обмена SAE J1939, рис. 1) сообщение о режиме «N» передается ЭБУ дизельного двигателя, который, обработав информацию, обесточивает пропорциональный электромагнитный клапан (ПЭМК) топливоподдачи, уменьшая до минимума цикловую подачу топлива в цилиндры. После выключения сцепления электронный блок 4 открывает четыре выходных порта CAN-модуля 3, формируя параллельные управляющие сигналы на блок электромагнитных клапанов. В коробке передач устанавливается нейтраль, после чего сигнал на ПЭМК модифи-

цируется, и сцепление плавно замыкается с заданным темпом.

При последующей установке водителем селектора режимов (рис. 1) в положение «D» (драйв) и нажатии на педаль газа ЭБУ 4 подает сигнал на ПЭМК управления сцеплением и параллельно «сбрасывает» в сеть информацию для ЭБУ двигателя о текущем положении селектора. Как только сцепление выключается, смарт-контроллер 4 формирует последовательные управляющие сигналы на блок электромагнитных клапанов КП, осуществляя сначала выбор штока, а затем включение оптимальной пе-

редачи исходя из реальных условий движения: скорости и фактической массы транспортного средства, положения педали газа, угловой скорости вращения коленвала и ведущих колес, номера предыдущей передачи. После этого сигнал на ПЭМК модифицируется, и сцепление плавно замыкается с заданным темпом. После включения сцепления топливоподача плавно увеличивается пропорционально положению педали газа, заданному водителем на начальной фазе.

Реальный объект исследования представлен на рис. 2. Основу аппаратной платформы проектируемой системы управления фрикционным сцеплением составляет пропорциональный электромагнитный клапан, контролирующий давление сжатого воздуха в рабочей полости исполнительного механизма (ИМ) – диафрагменной пневмокамеры. Управление ПЭМК осуществляется смарт-контроллером, выходной порт которого генерирует модулированный широтно-импульсный сигнал напряжения определенной скважности. Коэффициент заполнения площади ШИМ-сигнала изменяется от цикла к циклу в рамках управляющей программы контроллера в соответствии с разработанным алгоритмом.

Адаптивный алгоритм [2] трогания грузового автомобиля с места (рис. 3) в автоматическом режиме работы силового агрегата представляет

собой последовательность операций: управление селектором режимов работы трансмиссии – полное выключение сцепления – управление основной и дополнительной коробкой передач – управление двигателем – полное включение сцепления.

После перевода селектора режимов движения в положение «D» (рис. 1) водитель воздействует на педаль акселератора. Пропорциональность между углом поворота педали и перемещением рычага регулятора ТНВД обеспечивается контроллером ДВС путем широтно-импульсной модуляции сигнала на пропорциональный электромагнитный клапан с использованием обратной связи по перемещению рычага регулятора ТНВД и частоте вращения коленчатого вала ДВС [3].

Требуемый темп трогания автомобиля определяется скоростью перемещения педали газа, на основании которой ЭБУ трансмиссии рассчитывает предварительный требуемый темп включения сцепления и включаемый номер передачи. Параллельно, получая сигналы от под-селекторного концевого выключателя, датчика частоты вращения коленчатого вала двигателя, датчиков положения рычага подачи топлива и педали управления двигателем, ЭБУ трансмиссии формирует управляющий сигнал на открытие пропорционального электромагнитного клапана.

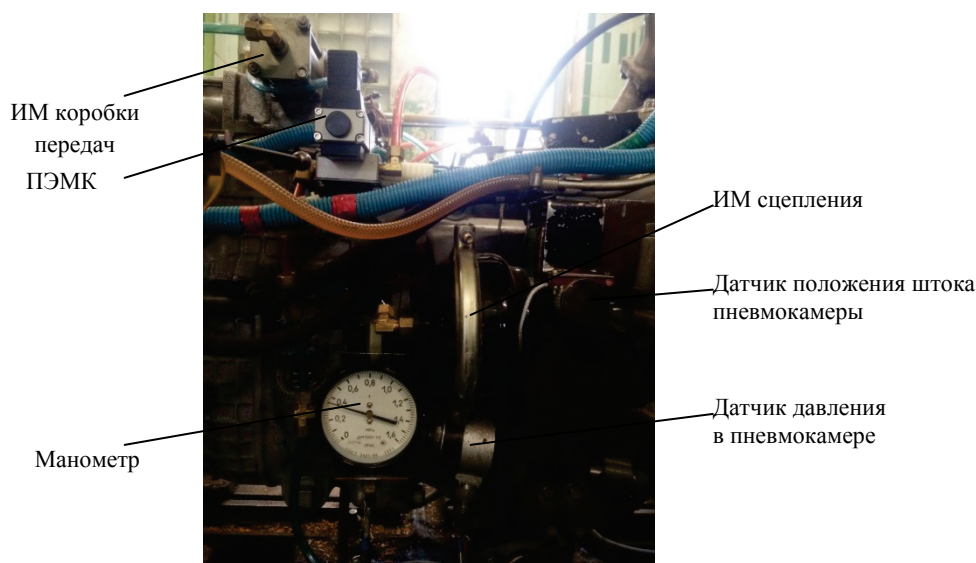


Рис. 2. Аппаратная платформа системы управления фрикционным сцеплением

Fig. 2. Devices of clutch control system

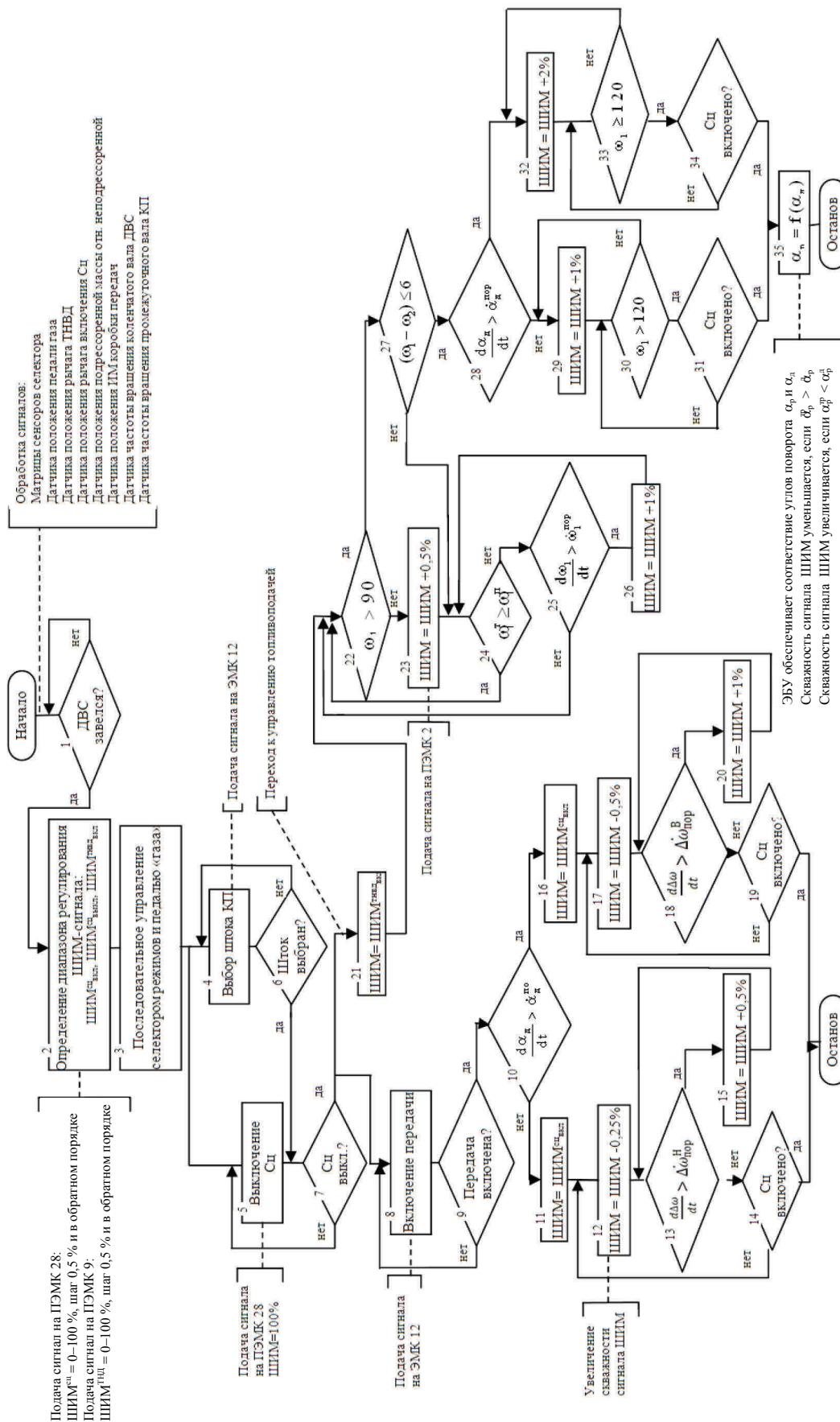


Рис. 3. Блок-схема адаптивного алгоритма трогания грузового автомобиля с места

Fig. 3. Block-scheme of truck start-up adaptive algorithm

Клапан срабатывает, и сжатый воздух поступает из ресивера питающей части 1 в пневмокамеру привода сцепления. Сцепление выключается. Обработав сигнал от датчика 18 перемещения рычага сцепления, ЭБУ трансмиссии последовательно формирует сигналы на электромагнитные клапаны 20, отвечающие за сброс-наполнение полостей пневмоцилиндров выбора и включения передачи исполнительного механизма 19, а также на электромагнитные клапаны 21 переключения ступеней делителя. После включения требуемой передачи (соответствующие концевики механизма переключения передач замкнуты) ЭБУ подает широтно-импульсный сигнал на пропорциональный электромагнитный клапан, увеличивая от цикла к циклу скважность сигнала на определенную величину, зависящую от скорости перемещения педали газа (рис. 3, блоки 12, 17). Кроме того, на заключительной фазе, когда разность угловых скоростей ведомой и ведущей частей сцепления не превышает 60 об/мин (рис. 3, блок 27), увеличение топливоподачи ДВС также будет зависеть от скорости перемещения педали газа (рис. 3, блоки 29, 32). Во избежание «перегрузки» сцепления в цепь управления введена обратная связь (рис. 3, блоки 13, 15, 18, 20) по относительной угловой скорости $d\Delta\omega/dt$ коленвала двигателя и промежуточного вала КП [4]. Обратная связь также вводится в цепь управления двигателем (рис. 3, блоки 25, 26) во избежание его заглохания вследствие снижения угловой скорости ω_1 коленчатого вала при включении сцепления.

Сжатый воздух из пневмокамеры 17 привода сцепления через пропорциональный клапан 16 постепенно выпускается в атмосферу, обеспечивая требуемый темп включения сцепления.

Адаптация управляющего алгоритма происходит при изменении механических и (или) электрических характеристик компонентов мехатронной системы, стиля вождения или весового состояния автотранспортного средства.

Функциональность разработанной мехатронной системы (рис. 1) и работоспособность адаптивного алгоритма трогания грузового автомобиля с места, схема которого приведена на рис. 3, подтверждены результатами полунатур-

ного эксперимента [5]. Обозначения на рисунке: α_d , α_p – угловое положение педали газа и рычага регулятора ТНВД, град.; $\dot{\alpha}_d^{\text{пор}}$ – пороговое значение угловой скорости перемещения педали газа, град./с; ω_1^T , ω_1^P – текущее и предыдущее значения угловой скорости ω_1 коленвала ДВС, рад/с; $\dot{\omega}_1^{\text{пор}}$ – пороговое значение интенсивности снижения угловой скорости коленвала ДВС, рад/с²; $\Delta\dot{\omega}_{\text{пор}}^H$, $\Delta\dot{\omega}_{\text{пор}}^B$ – нижнее и верхнее пороговые значения относительного углового ускорения ведущего и ведомого дисков сцепления, рад/с²; $\text{ШИМ}_{\text{вкл}}^{\text{сц}}$, $\text{ШИМ}_{\text{выкл}}^{\text{сц}}$ – величина ШИМ-сигнала, соответствующая началу включения и выключения сцепления, %; $\text{ШИМ}_{\text{вкл}}^{\text{тнвд}}$ – величина ШИМ-сигнала, соответствующая началу перемещения рычага ТНВД, %.

Схематизация вышеописанного исследуемого объекта проводилась в соответствии с концепцией регулярных динамических схем [6, 7]. Действительная распределенная система грузового автомобиля заменена эквивалентной механической моделью (рис. 4), состоящей из упруго-диссипативных звеньев и сосредоточенных инерционных масс. Параметры упрощенной динамической модели приведены в табл. 1.

При математическом описании разработанной динамической модели использовался широко известный в классической механике принцип Д'Аламбера – Лагранжа, позволяющий применять инструментарий аналитической статики для разработки уравнений движения элементов механической системы. В качестве обобщенных координат были приняты угловые скорости инерционных масс и крутящие моменты в упругих звеньях.

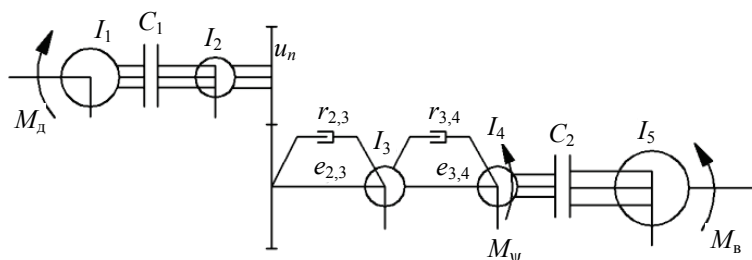


Рис. 4. Упрощенная динамическая модель силового агрегата грузового автомобиля

Fig. 4. Simplified dynamic model of truck power system

Таблица 1

Параметры упрощенной динамической модели
Parameters of simplified dynamic model

$I_1, \text{кг} \cdot \text{м}^2$	$I_2, \text{кг} \cdot \text{м}^2$	$I_3, \text{кг} \cdot \text{м}^2$	$I_4, \text{кг} \cdot \text{м}^2$	$I_5, \text{кг} \cdot \text{м}^2$	$e_{2,3}, \text{рад/Нм}$	$e_{3,4}, \text{рад/Нм}$	$r_{2,3}, \text{Нм} \cdot \text{с/рад}$	$r_{3,4}, \text{Нм} \cdot \text{с/рад}$
2,50	0,26	3,18	0,08	373,70	$6,74 \cdot 10^{-5}$	$1,58 \cdot 10^{-5}$	13,83	73,92

Таким образом, имитационная модель представлена системой логико-дифференциальных уравнений Лагранжа II рода, являющихся базо-

выми для исследования динамики механических систем с голономными связями:

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_1 &= (M_d - (M_{2,3} + Mr_{2,3})/U_n L_1 P_1 - M_{\text{сц}} \text{sign}(\omega_1 - \omega_2) L_2 P_2) / (I_1 + I_2 L_1); \\ \dot{\omega}_2 &= (M_d L_1 P_1 + M_{\text{сц}} \text{sign}(\omega_1 - \omega_2) - (M_{2,3} + Mr_{2,3})/U_n) / (I_2 + I_1 L_1); \\ \dot{M}_{2,3} &= (\omega_2 / U_n - \omega_3) / e_{2,3}; \quad Mr_{2,3} = (\omega_2 / U_n - \omega_3) r_{2,3}; \\ \dot{\omega}_3 &= (M_{2,3} + Mr_{2,3} - (M_{3,4} + Mr_{3,4})) / I_3; \\ \dot{M}_{3,4} &= (\omega_3 - \omega_4) / e_{3,4}; \quad Mr_{3,4} = (\omega_3 - \omega_4) r_{3,4}; \\ \dot{\omega}_4 &= (M_{3,4} + Mr_{3,4} - M_{\psi} \text{sign} \omega_4 - M_{\phi} \text{sign}(\omega_4 - \omega_5) L_4 P_4) / (I_4 + I_5 L_3); \\ \dot{\omega}_5 &= ((M_{3,4} + Mr_{3,4}) L_3 P_3 + M_{\phi} \text{sign}(\omega_4 - \omega_5) L_4 P_4 - M_b \text{sign} \omega_5) / (I_5 + I_4 L_3); \\ L_1 &= \begin{cases} 1, |\omega_1 - \omega_2| \leq 0,01; \\ 0, |\omega_1 - \omega_2| \geq 0,01; \end{cases} \quad L_2 = \begin{cases} 1, |\omega_1 - \omega_2| \geq 0,01; \\ 0, |\omega_1 - \omega_2| \leq 0,01; \end{cases} \\ L_3 &= \begin{cases} 1, |\omega_4 - \omega_5| \leq 0,01; \\ 0, |\omega_4 - \omega_5| \geq 0,01; \end{cases} \quad L_4 = \begin{cases} 1, |\omega_4 - \omega_5| \geq 0,01; \\ 0, |\omega_4 - \omega_5| \leq 0,01; \end{cases} \\ P_1 &= 0,5 \cdot [1 + \text{sign}(M_{\text{сц}} - |\dot{\omega}_2 I_2 + M_{2,3} + Mr_{2,3}|)]; \\ P_2 &= 0,5 \cdot [1 - \text{sign}(M_{\text{сц}} - |\dot{\omega}_2 I_2 + M_{2,3} + Mr_{2,3}|)]; \\ P_3 &= 0,5 \cdot [1 + \text{sign}(M_{\phi} - |\dot{\omega}_4 I_4 + M_{3,4} + Mr_{3,4}|)]; \\ P_4 &= 0,5 \cdot [1 + \text{sign}(M_{\phi} - |\dot{\omega}_4 I_4 + M_{3,4} + Mr_{3,4}|)], \end{aligned}$$

где $\omega_i, \dot{\omega}_i$ – угловые скорость и ускорение массы с моментом инерции I ($i = 1-4$); $M_{j,j+1}, \dot{M}_{j,j+1}$ – упругий момент и скорость изменения упругого момента в звене с податливостью $e_{j,j+1}$ ($j = 2, 3$); $Mr_{j,j+1}$ – демпфирующий момент в упругом звене с податливостью $e_{j,j+1}$; M_d – крутящий момент двигателя; $M_{\text{сц}}$ – момент трения, развиваемый сухим фрикционным сцеплением; M_{ψ}, M_b – приведенные к выходному валу КП моменты от сил суммарного дорожного сопротивления и от силы сопротивления воздуха; M_{ϕ} – приведенный к выходному валу КП момент сцепления движителя с дорогой; L_k, P_m – соответственно функция предикат и прерыватели ($k = 1-2; j = 1-4$); $U_n = 7,82$ – передаточное число ступени, с которой осуществляется трогание автомобиля с места.

Крутящий момент M_d определялся как функция от положения педали газа и угловой скорости калевала с использованием внешней скоростной характеристики двигателя [5].

Крутящий момент, передаваемый сцеплением, определялся эмпирически по формуле [8]

$$M_{сц} = M_{сmax} (1 - e^{-\tau t}),$$

где τ – темп включения сцепления; $M_{сmax}$ – максимальный момент трения сцепления,

$$M_{сmax} = \beta M_{дmax},$$

$\beta = 1,8$ – коэффициент запаса сцепления; $M_{дmax} = 650 \text{ Н}\cdot\text{м}$ – максимальный крутящий момент ДВС.

Моменты M_ϕ , M_ψ , M_B в приведении к выходному валу КП определялись по формулам:

$$M_\phi = \phi G_\phi r_0 / u_T;$$

$$M_\psi = f G_a r_0 / u_T;$$

$$M_B = k_B S_a v^2 r_0 / u_T,$$

где $\phi = 0,8$ – коэффициент сцепления шин с опорной поверхностью; $G_\phi = 155684,7 \text{ Н}$ – сцепной вес автомобиля; $G_a = 196200 \text{ Н}$ – полный вес автомобиля; v – продольная скорость автомобиля, м/с; $k_B = 0,33 \text{ Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^4$ – коэффициент сопротивления воздуха; $S_a = 5,9 \text{ м}^2$ – площадь лобового сопротивления автомобиля; $r_0 = 0,51 \text{ м}$ – радиус качения колес без скольжения; $f = 0,01$ – коэффициент сопротивления качению; $u_T = 5,43$ – передаточное число главной передачи автомобиля.

Моделирование вышеописанной мехатронной системы управления фрикционным сцеплением выполнено на базе платформы AMESim [9] (рис. 5), позволяющей отрабатывать комплексные алгоритмы управления узлами и агрегатами мобильных машин. Параметры ПЭМК (индуктивность обмотки, диаметр и ход золотника и т. д.) в модели полностью соответствуют параметрам оригинала (VER3121-1). Дизельный двигатель представлен упрощенной субмоделью, выходная характеристика которой представляет собой зависимость крутящего момента от угловой скорости коленвала и положения педали управления топливоподачей. Субмодель сухого фрикционного сцепления выбрана повторно-интегрированной, поскольку

состояние фрикционного узла и характер протекания трибологического процесса определяются как трением скольжения, так и трением покоя. Механическая часть трансмиссии в модели AMESim идентична вышеприведенной упрощенной динамической модели (рис. 4) и имеет аналогичные с ней параметры (табл. 1). Грузовой автомобиль представлен упрощенной субмоделью с возможностью вводить такие параметры, как: масса, коэффициент сцепления шины с дорогой, лобовая площадь, коэффициент сопротивления воздуха, сопротивление подьему.

Результаты моделирования процесса трогания грузового автомобиля с места в пакете AMESim с шагом интегрирования $0,001 \text{ с}$ и их сопоставления с осциллограммой реального процесса, полученной при проведении полунатурного эксперимента на испытательном стенде, показали менее 5 % погрешности машинного эксперимента по величине и характеру изменения угловых скоростей ведомой и ведущей частей фрикционного сцепления генерируемому току в обмотках ПЭМК и времени буксования сцепления ($0,8 \text{ с}$) [5], что свидетельствует об адекватности разработанной модели реальному физическому объекту.

Для количественной оценки качества исследуемого процесса использовались следующие оценочные показатели: удельная максимальная мощность $N_{уд}^{max}$ и удельная работа буксования $L_{уд}$ сцепления, коэффициент динамических нагрузок $K_{дин}$ и максимальный размах колебаний производной продольного ускорения автомобиля по времени $\dot{v}_a$.

Удельные максимальная мощность и работа буксования сцепления [9] определялись по формулам:

$$N_{уд}^{max} = \max \left[\frac{M_{тр} \omega_{отн}}{S_{тр}} \right];$$

$$L_{уд} = \frac{1}{S_{тр}} \int_0^{t_6} (M_{тр} \omega_{отн}) dt,$$

где $M_{тр}$ – момент трения, Н·м; $\omega_{отн}$ – относительная угловая скорость поверхностей трения, рад/с; $S_{тр}$ – площадь поверхностей трения, см^2 , $S_{тр} = 2440 \text{ см}^2$; t_6 – время буксования, с.

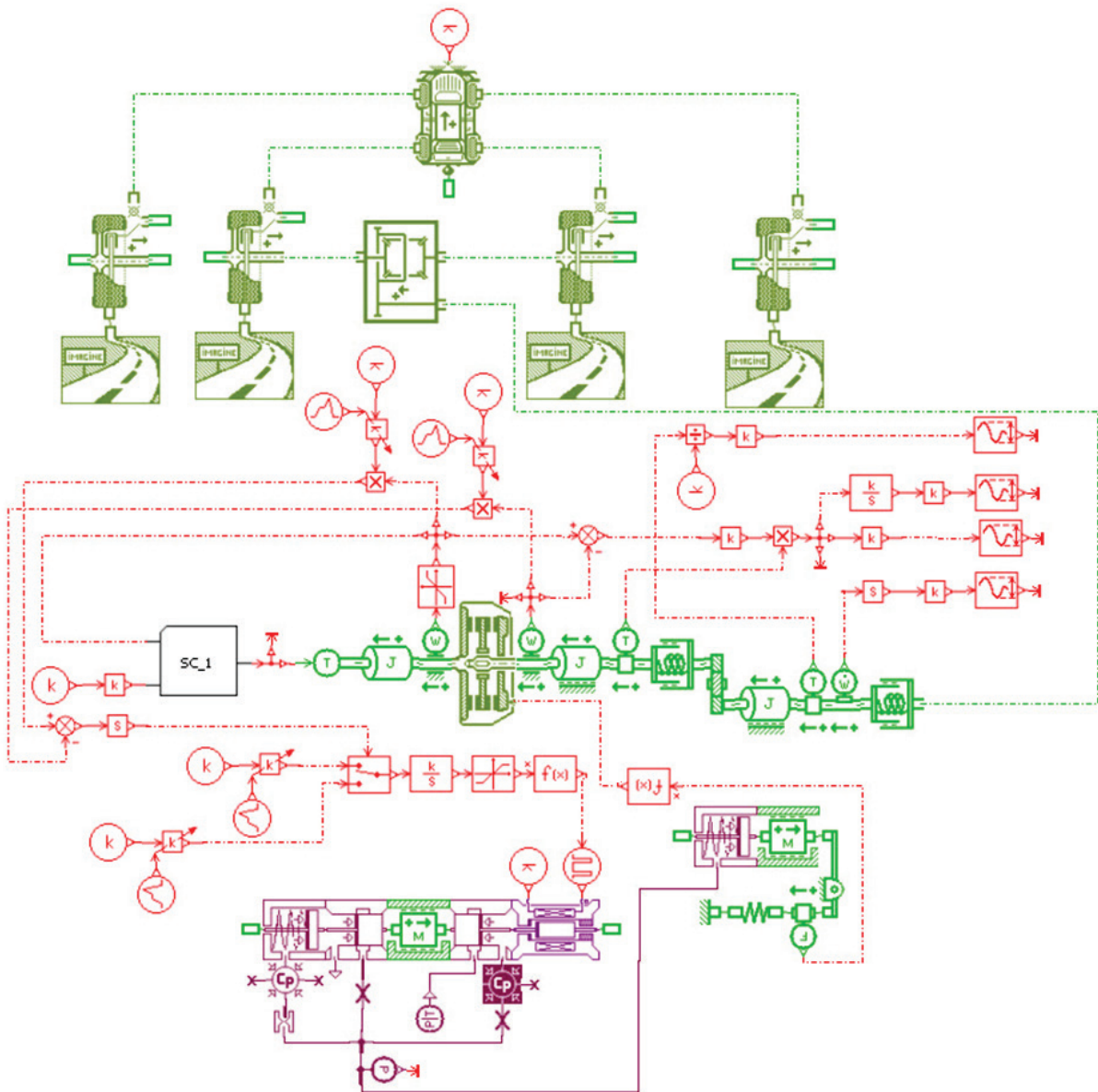


Рис. 5. Мультидисциплинарная модель автоматизированного силового агрегата в AMESim

Fig. 5. Multidisciplinary simulation model of automated power system on AMESim

Коэффициент динамических нагрузок [6]

$$K_{\text{дин}} = \frac{M_{\text{дин}}^{\text{max}}}{M_{\text{л}}^{\text{max}}},$$

где $M_{\text{дин}}^{\text{max}}$ – максимальный динамический крутящий момент в трансмиссии в процессе трогания с места, Н·м; $M_{\text{д}}^{\text{max}}$ – приведенный максимальный крутящий момент двигателя, Н·м.

Максимальное значение производной продольного ускорения автомобиля

$$\ddot{v}_a = \max \left[\frac{d\dot{v}_a}{dt} \right],$$

где $\dot{v}_a$ – продольное ускорение автомобиля, м/с².

Выбранные показатели оценивают влияние организации переходных процессов, вызванных троганием с места, на основные эксплуатационные и нагрузочные характеристики автомобиля.

Определение предельных значений темпа управления сцеплением производилось с по-

мощью разработанной в AMESim имитационной модели методом прямого перебора с шагом $p = 0,05 \text{ с}^{-1}$ с условием прекращения поиска по превышению критериальных ограничений хотя бы по одному из четырех вышеописанных оценочных показателей [10]:

$$\begin{aligned} [N_{\text{уд}}^{\text{max}}] &= 40 \text{ Вт/см}^2; [L_{\text{уд}}] = 15 \text{ Дж/см}^2; \\ [K_{\text{дин}}] &= 2; [\ddot{v}_a] = 35\text{--}50 \text{ м/с}^3. \end{aligned}$$

В качестве начального приближения взяты параметры алгоритма трогания при среднем темпе управления сцеплением $K_c = 0,1 \text{ с}^{-1}$. Темп управления ДВС в процессе проведения эксперимента не варьировался, т. е. был принят постоянным $K_d = 0,72 \text{ с}^{-1}$.

Аналогично методом прямого перебора с шагом $p = 1 \text{ рад/с}^{-2}$ находили пороговые значения параметра обратной связи (приращение разности угловых скоростей ведомого и ведущих частей сцепления) при предварительно определенном темпе управления сцеплением.

Основные результаты машинного эксперимента по нахождению предельных значений темпа управления сцеплением и параметра обратной связи при трогании грузового автомобиля представлены в табл. 2. При росте темпа включения сцепления наблюдается убывание работы буксования, увеличение мощности буксования, коэффициента динамичности и приращения разности угловых скоростей ведомого и ведущего дисков, что соответствует реальным физическим процессам.

Таблица 2

Показатели переходного процесса при трогании грузового автомобиля

Indicators of truck start-up transient process

Темп управления сцеплением $K_c, \text{с}^{-1}$	Оценочный показатель переходного процесса				Пороговое значение параметра обратной связи
	$N_{\text{уд}}^{\text{max}}, \text{Вт/см}^2$	$L_{\text{уд}}, \text{Дж/см}^2$	$K_{\text{дин}}$	$\ddot{v}_a, \text{м/с}^3$	$\Delta\omega, \text{рад/с}^2$
0,2	9,87	15,11	0,83	2,39	33
0,3	11,74	14,41	1,11	3,59	44
0,4	13,53	13,88	1,17	4,78	48
0,5	14,64	13,44	1,24	6,91	55
1	19,53	12,08	1,67	12,01	75
2	25,25	10,67	1,90	22,90	110
4	33,4	10,01	1,95	34,93	140
5	36,76	9,92	1,76	37,69	150
6	39,2	9,83	1,96	39,40	170

ВЫВОДЫ

1. Разработана мультидисциплинарная модель мехатронной системы управления силовым агрегатом грузового автомобиля на основе платформы AMESim, позволяющая производить анализ динамических процессов в автоматизированной трансмиссии и предсказывать поведение интеллектуальных систем на ранних стадиях проектирования. Адекватность данной разработанной модели подтверждена полунатурным экспериментом.

2. Определены пороговые значения параметра обратной связи для программирования электронного блока управления трансмиссией при трогании с места. Как показали результаты эксперимента, верхнее пороговое значение параметра обратной связи по относительной угловой скорости ведущей и ведомой частей сцепления составляет 170 рад/с^2 , превышение которого требует коррекции управляющего сигнала со стороны ПИД-регулятора, контролирующего трибологический процесс замыкания фрикционного узла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кусяк, В. А. Проектирование автоматизированных мехатронных систем управления силовым агрегатом грузовых автомобилей и автопоездов / В. А. Кусяк, О. С. Руктешель. Минск: БНТУ, 2015. 295 с.
2. Адаптивный алгоритм трогания с места в автоматическом режиме управления силовым агрегатом автопоезда / О. С. Руктешель [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. трудов. Минск: Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, 2014. Вып. 3. С. 106–110.
3. Электронное управление топливоподачей дизельного двигателя на основе программного ПИД-регулирования / А. Г. Баханович [и др.] // Наука и техника. 2017. № 1. С. 28–37.
4. Управление фрикционным сцеплением на основе ШИМ-сигнала с однопараметрической обратной связью / Л. Г. Красневский [и др.] // Перспективные приводные системы, трансмиссии и робототехнические комплексы: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 20–21 окт. 2011 г. Могилев: Белорусско-Российский ун-т, 2011. С. 44–47.
5. Le, Van Nghia. A Research on Start-Up Clutch Control for AMT with AmeSim Platform / Van Nghia Le, V. A. Kusiak, T. H. Nguyen // 2nd National Conference on Mechanical Engineering and Automation, 7–8 Oct. 2016. Hanoi, Vietnam: Hanoi University of Science and Technology. P. 188–196.
6. Multiphysics Modeling and Optimization of Mechatronic Multibody Systems / J. C. Samim [et al.] // Multibody System Dynamics. 2000. No 18. P. 345–373.
7. Blundell, M. The Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics / M. Blundell, D. Harty. New York, 2004. 288 p.
8. Kiencke, U. Automotive Control System / U. Kiencke, L. Nielson. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. 512 p. <https://doi.org/10.1007/b137654>.
9. Imagine. Lab AMESim: User Manual Version 14 / LMS Company Ltd. Germany, 2014. 267 p.
10. Захарик, Ю. М. Научные основы обеспечения тягово-скоростных свойств грузовых автомобилей путем синтеза систем автоматического управления тяговыми режимами / Ю. М. Захарик. Минск, 2007. 354 с.

Поступила 24.04.2018

Подписана в печать 03.07.2018

Опубликована онлайн 28.09.2018

REFERENCES

1. Kusiak V. A., Ruktshel O. S. (2015) *Designing of Automated Mechatronic Systems for Controlling Power-transmission Plants in Automotive Trucks and Road Trains*. Minsk, Belarusian National Technical University. 295 (in Russian).
2. Ruktshel' O. S., Kusiak V. A., Belevich A. V., Lutsii V. I. (2014) Adaptive Algorithm for Starting From Standstill in Automatic Mode to Control Power-Transmission Plant of Road Train. *Aktualnye Voprosy Mashinovedeniya. Sb. Nauch. Trudov* [Matters of Current Interest in Mechanical Engineering: Collection of Research Papers]. Minsk, Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, 3, 106–110 (in Russian).
3. Bakhanovich A. G., Kusiak V. A., Gurin A. N., Le V. (2017) Electronic Control for Fuel Supply of Diesel Engine on the Basis of Programmable PID-Regulator. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (1), 28–37 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-1-28-37>.
4. Krasnevskii L. G., Belevich A. V., Kusiak V. A., Filimonov A. A. (2011) Friction Clutch Control on the Basis of PWM-Signal with Single-Parametric Backfeed. *Perspektivnye Privodnye Sistemy, Transmissii i Robototekhnicheskie Kompleksy: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Mogilev, 20–21 okt. 2011 g.* [Advanced Drive Systems, Transmissions and Robotic Complexes: Proceedings of International Scientific and Technical Conference, Mogilev, October 20–21, 2011]. Mogilev, Belarusian-Russian University, 44–47 (in Russian).
5. Le Van Nghia, Kusiak V. A., Nguyen T. H. (2016) A Research on Start-Up Clutch Control for AMT with AmeSim Platform. *2nd National Conference on Mechanical Engineering and Automation, 7–8 Oct. 2016*. Hanoi, Vietnam, Hanoi University of Science and Technology, 188–196.
6. Samin J. C., Bröls O., Collard J. F., Sass L., Fiset P. (2000) Multiphysics Modeling and Optimization of Mechatronic Multibody Systems. *Multibody System Dynamics*, (18), 345–373. <https://doi.org/10.1007/s11044-007-9076-0>.
7. Blundell M., Harty D. (2004) *The Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics*. New York, Butterworth-Heinemann. 288. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-5112-7.X5000-3>.
8. Kiencke U., Nielson L. (2005) *Automotive Control System*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 512. <https://doi.org/10.1007/b137654>.
9. LMS Company Ltd. (2014) *Imagine. Lab AMESim: User Manual Version 14*. Germany. 267.
10. Zakharik Yu. M. (2007) *Scientific Fundamentals for Provision of Towing –Speed Properties in Automotive Trucks while Using Synthesis of Systems for Automatic Control of Towing Modes*. Minsk. 354 (in Russian).

Received: 24.04.2018

Accepted: 03.07.2018

Published online: 28.09.2018

Трансформация мировой автомобильной промышленности

Магистр экон. наук П. П. Сушкевич¹⁾

¹⁾Международный университет «МИТСО» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Мировая промышленность находится на пороге нового витка развития, характеризующегося появлением таких прорывных технологий, как: блокчейн, беспилотные устройства, трехмерная печать, виртуальная реальность, Интернет вещей, дополненная реальность и т. д. В результате этого коренные изменения произойдут в большинстве отраслей экономики. Автомобилестроение не исключение. Данная отрасль играет одну из ключевых ролей в экономике множества государств, и изменения, происходящие в ней, приводят не только к созданию новых продуктов, технических процессов, но и к совершенствованию уже имеющегося производственного плацдарма. В частности, для Республики Беларусь автомобильная промышленность – одна из ключевых отраслей экономики, и ее эффективность имеет высокую степень зависимости от скорости возникновения и реализации инноваций – стратегически важного аспекта повышения конкурентоспособности как на текущих, так и на потенциальных рынках сбыта. В статье уделено внимание двум основным трендам, возникающим в процессе формирования новой индустриализации: повышению экологичности топливных систем и цифровой трансформации. Проблемы мировой экологии оказали значительное влияние на разработки в сфере альтернативных источников энергии. Скорость развития и популяризации электромобилей значительно превосходит «прорывные» инновационные разработки прошлого. Однако на будущее электромобилей могут значительно повлиять множество факторов, два из которых подробно рассмотрены в статье: стоимость энергии (батарей) и цена нефти (при цене около 20 дол. за баррель темп развития значительно снизится). Помимо вопроса экологичности, уделено внимание сервисам цифровой трансформации. В мире уже существуют примеры использования удаленного управления карьерными самосвалами, телематики и т. д. Все это позволяет организациям значительно оптимизировать расходную часть бизнеса, тем самым увеличив эффективность использования имеющихся ресурсов. Приводится обзор инноваций в автомобилестроительной отрасли Беларуси (электромобили «БелДжи», электробусы «Белкоммунмаш», разработки представителей крупной промышленной техники).

Ключевые слова: инновации, новая индустриализация, автомобильная промышленность, электромобили, электрогрузовики, цифровая трансформация

Для цитирования: Сушкевич, П. П. Трансформация мировой автомобильной промышленности / П. П. Сушкевич // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 5. С. 432–439. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-432-439>

Transformation of World Automotive Industry

P. P. Sushkevich¹⁾

¹⁾International University “MITSO” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The world industry is on a threshold of a new development cycle which is characterized by emergence of breakthrough technologies: distributed ledger technology, drone-type devices, 3D printing, virtual reality, Internet of things, augmented reality etc. Due to these technologies fundamental changes will take place in the majority of economic branches. The automotive industry is not an exception. This industry plays one of the key roles in economy in a great number of countries and changes occurring in it lead not only to creation of new products, technical processes but these changes also entail improvement of the industrial base which has been already created. The Republic of Belarus considers an automotive industry as one of key industries for its economy and its efficiency has a high dependency factor pertaining to speed of innovation emergence and implementation that is strategically important aspect of increase in competitiveness both on current sales markets and on potential ones. The paper pays a special attention to two main trends arising in the course of forming a new industrialization: increase in environmentally-friendly fuel systems and digital transformation. Problems of world ecology have exerted a considerable impact on developments in the field of alternative energy sources. Speed of development and promotion of electric vehicles considerably exceed “breakthrough” innovation developments of the past. However a great number

Адрес для переписки
Сушкевич Павел Петрович
Международный университет «МИТСО»
ул. Казинца, 21, к. 3,
220099, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 279-98-54
pavelsushkevich@gmail.com

Address for correspondence
Sushkevich Pavel P.
International University “MITSO”
21, k. 3 Kazintsa str.,
220099, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 279-98-54
pavelsushkevich@gmail.com

of factors can have a significant effect on the future of electric vehicles and two of them are thoroughly considered in the paper: cost of energy (batteries) and price of oil (at the price of about 20 USD for barrel the development rate will considerably decrease). Besides the matter of environmental friendliness the paper pays attention to services of digital transformation. The world has already presented examples pertaining to usage of remote control for dump trucks, telematics etc. Such an approach makes it possible for organizations to optimize substantially an expenditure budget and doing so we increase resource use efficiency. The paper also contains a review of innovations in the automotive industry of the Republic of Belarus: BelGee electric cars, Belkommunmash electrobuses, developments of large industrial equipment.

Keywords: innovation, new industrialization, automotive industry, electric cars, electric trucks, digital transformation

For citation: Sushkevich P. P. (2018) Transformation of World Automotive Industry. *Science and Technique*. 17 (5), 432–439. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-432-439> (in Russian)

Введение

Новое тысячелетие ознаменовалось глобальными изменениями (возникновение технологии блокчейн, использование беспилотных устройств, трехмерная печать, виртуальная и дополненная реальности, Интернет вещей и т. д.). Данные технологии вносят значительные преобразования в большинство сфер жизнедеятельности человека. Мы находимся на пороге нового витка индустриализации, которая, по оценкам экспертов, полностью нивелирует технологические границы, вследствие чего коренные изменения произойдут на всех производственных и технологических цепочках [1].

Существует несколько точек зрения касательно масштабов и классификации происходящей трансформации. В 2012 г. авторитетное британское издание *The Economist* в качестве одной из ключевых тем номера выбрало «Третью промышленную революцию» [2]. На Всемирном экономическом форуме в Давосе в 2016 г. применен термин «промышленность 4.0» [3], призванный консолидировать возникающие прорывные технологии. Независимо от классификации, тема новой индустриализации привлекает к себе все большее внимание в общемировой экономической проблематике.

В условиях новой индустриализации значительным изменениям будут подвержены все отрасли. В статье внимание сфокусировано на тех изменениях, которые уже начались и еще предстоят как легковому, так и грузовому автомобилестроению.

Векторы развития автомобилестроения

Сфера грузового автомобилестроения тяжело пережила кризис 2007–2010 гг. Только в 2013-м начали появляться первые признаки восстановления до прежнего уровня (рис. 1).

По оценкам экспертов PWC¹, средний прирост рынка в 2017–2020 гг. составит около 3,7 % [4].



Рис. 1. Динамика мирового рынка коммерческой техники (Источник: построено на основе данных OICA²)

Fig. 1. Dynamics of world commercial vehicles market (Source: Prepared on the basis of OICA² data)

Автомобилестроение – динамичная отрасль, развивающаяся под влиянием большого количества факторов. Ключевые из них принято делить на пять групп (рис. 2).



Рис. 2. Ключевые факторы, влияющие на развитие автомобилестроения (Источник: построено на основе исследования PWC: The truck industry in 2020 [4])

Fig. 2. Key factors influencing on development of automotive industry (Source: Prepared on the basis of PWC research: Truck industry in 2020)

¹ PWC – Price Waterhouse Coopers.

² OICA – International Organization of Motor Vehicle Manufacturers.

Рассмотрим детально наиболее важный фактор в условиях новой индустриализации – инновации. Сфокусируемся на таких направлениях, как:

- электромобили – как решение экологических проблем;
- цифровая трансформация (англ. Digital Transformation).

Экологичность транспорта

Климатические изменения в совокупности с проблемами мировой экологии заставили производителей автомобильной техники обратить внимание на повышение экологичности топливных систем, снижение выбросов в атмосферу, а также на разработку современных типов двигателей, призванных заменить двигатели внутреннего сгорания. Одним из ключевых моментов в решении данного вопроса является

используемое топливо. Будущее, которое ждет грузовое автомобилестроение в части источников энергии, уже сейчас можно наблюдать на примере легкового транспорта. С момента возникновения первых электромобилей прошел относительно небольшой временной промежуток, однако о скорости развития и распространения данной «инновации» уже можно делать выводы: ее темп значительно превышает темпы развития популярных разработок прошлого.

О запусках производства электромобилей говорят не только многие мировые автоконцерны, но и новые известные игроки из других сфер: Alibaba [5], Apple [6], Google [7]. В опубликованном Bloomberg New Energy Finance исследовании говорится, что продажи электромобилей к 2040 г. достигнут 41 млн единиц. Это составит 35 % от рынка продаж легковых автомобилей (рис. 4).

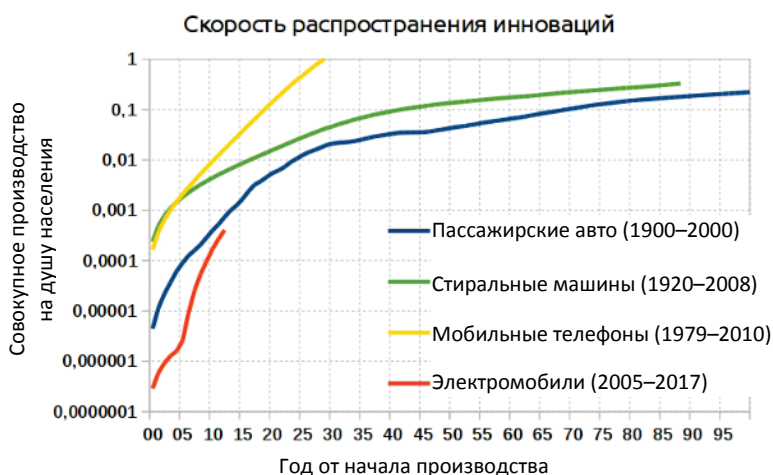


Рис. 3. Скорость распространения инноваций (Источник: Bento and Wilson, 2013)

Fig. 3. Speed of innovation diffusion (Source: Bento and Wilson, 2013)

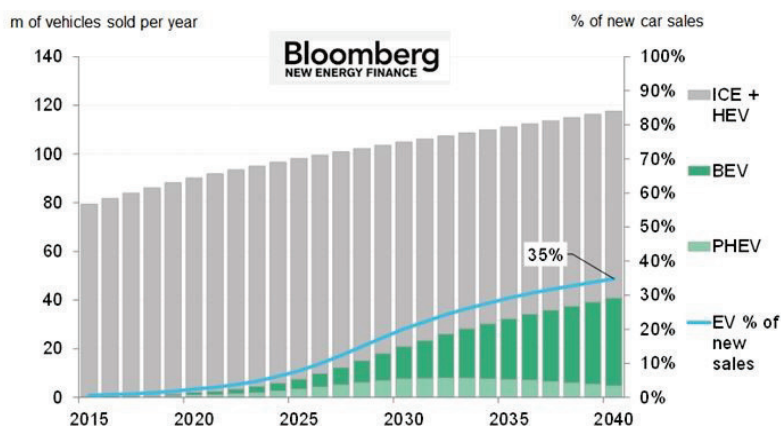


Рис. 4. Прогноз продаж электромобилей (Источник: исследование Bloomberg New Energy Finance)

Fig. 4. Forecasting for sales of electric cars (Source: Bloomberg New Energy Finance Research)

В основе данного прогноза лежит исследование по изменению стоимости литий-ионных батарей. Их стоимость заметно снижается (350 дол. за 1 кВт·ч в 2016-м), относительно 2010 г. падение составило 65 %. Прогнозируется, что к 2030 г. она снизится до 120 дол. (рис. 5). Наряду со стоимостью литий-ионных батарей одним из ключевых факторов является стоимость барреля нефти. В данном прогнозе ожидается ее рост до 70 дол. за баррель в 2040-м. При реализации противоположного сценария (падение до 20 дол.) темп развития электромобилей значительно снизится [8].

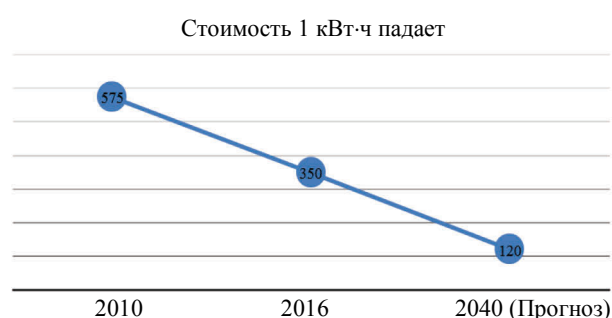


Рис. 5. Динамика стоимости 1 кВт·ч литий-ионной батареи (Источник: исследование Bloomberg New Energy Finance)

Fig. 5. Dynamics in cost of 1 kW·h Li-Ion battery (Source: Bloomberg New Energy Finance Research)

В данный момент говорить о полноценной борьбе электромобилей с автомобилями пока рано: за 2016 г. произведено 466 тыс. электромобилей против сотен миллионов автомобилей – разница более чем значительная [9]. Однако все может заметно измениться уже в ближайшие 5–10 лет (учитывая многочисленные заявления мировых автоконцернов о завершении производства автомобилей с ДВС, а крупных стран – о запрете на передвижения данных автомобилей). Имеют место теории о том, что переход на электромобили не сократит выбросы CO₂, а просто перенесет их с автомобилей на производственные мощности. Украинский источник «Экономические известия» представил расчеты на примере США (выбор обусловлен большим объемом статистических данных), согласно которым (исходя из средних показателей выбросов) объемы CO₂ сократятся чуть менее чем в два раза [10].

Электрогрузовики только начинают свой путь. Их отставание от электромобилей оценивается в 10 лет. Однако уже в 2017 г. компания Mercedes-Benz Trucks представила первую ограниченную серию электрогрузовиков с запасом хода 200 км [11]. Развитие электрогрузовиков выглядит перспективным не только из-за значительного снижения выбросов CO₂, но и из-за существенного снижения операционных расходов при их эксплуатации.

Цифровая трансформация

Отдельную и значимую роль играют сервисы цифровой трансформации автомобиля/грузовика: телематика, подключенность грузовиков к системам управления, BigData, облачные сервисы, Интернет вещей. Согласно исследованиям консалтинговой компании Navigant Research³, емкость рынка интеллектуальных технологий сбора данных в 2016 г. составил 57,6 млн дол., а к 2025-му увеличится до 223,6 млн дол. [12]. Активно в разработке интеллектуальных систем управления грузовыми автомобилями участвует Volvo Trucks. «Если есть та сфера, в которой развитие IT происходит с поразительной скоростью, так это автомобильная промышленность», – считает Per Adamsson, директор по стратегии и развитию бизнеса Volvo Group Telematics. Цифровая трансформация грузовых автомобилей позволяет получать в режиме онлайн большое количество данных о состоянии транспортных средств, что в результате поможет избежать незапланированных задержек при выполнении задач по причине поломок. Согласно исследованиям Volvo Trucks, прямые затраты на одну незапланированную остановку оцениваются примерно в 1 тыс. евро для средней по размерам европейской транспортной компании. И это только прямые затраты, помимо которых возникает никакая операционные и репутационные риски.

Volvo Trucks уже использует для анализа степени износа деталей телематику. Однако оснащение каждого агрегата собственным датчиком значительно увеличивает стоимость грузовика, поэтому стратегически важной задачей

³ Navigant Research – консалтинговая компания, специализирующаяся на исследовании глобальных экологически чистых технологий.

является поиск способа анализа данных, позволяющего охватывать весь грузовик. Один из проектов, направленных на решение данной задачи, – In4Uptime. В данном проекте вывод о техническом состоянии грузового автомобиля принимается на основе трех типов сигналов. В первую очередь используются самогенерируемые сигналы, получаемые от блока управления грузовика. Во-вторых, используются исторические данные с других грузовиков, к примеру, история обслуживания в мастерских. В-третьих, используются внешние данные – информация из Интернета или внешних поставщиков о дорожном движении, погоде и т. д. В результате система дает возможность выявить отклонения и сделать прогноз возникновения дефектов [13].

Еще одним примером применения цифровой трансформации в сфере грузовых автомобилей является опыт международной горнодобывающей компании Rio Tinto, которая решила задачу автоматизации добычи на железных рудниках. Данная организация оснастила свои горнодобывающие самосвалы диагностическими датчиками, благодаря которым менеджмент контролировал производительность собственных активов. Собранная совокупность данных обрабатывалась с целью достижения автоматизированного выполнения текущих задач. В настоящее время Rio Tinto имеет 69 автономных карьерных самосвалов Komatsu, каждый из которых использует GPS-модули для перемещения грузов без водителя. «Автоматизированные самосвалы гораздо лучше справляются с поставленными задачами, так как они сводят к минимуму задержки, оптимизируют расходы топлива, повышают безопасность», – подвел итог Жан-Себастьян Жак, генеральный директор Rio Tinto [14].

Пример Rio Tinto – не единственный в своем роде. В 2016 г. на дорогах общего пользования прошли тестирование 12 беспилотных грузовиков, разработанных компаниями Scania, Daimler, Volvo, Man, Iveco, DAF. Крупный китайский производитель грузовой техники FAW планирует в 2018-м запустить серийный выпуск беспилотных грузовиков. Безусловно, присутствует множество ограничивающих факторов, которые не позволяют ускорить темп цифровой трансформации. Существуют законодательные

барьеры (ограничения на использование, в том числе сугубо на закрытых территориях), кибербезопасность (по экспертным данным, количество кибератак на подключенные к Интернету объекты за 2015–2016 гг. увеличилось в четыре-пять раз). Кроме того, существенной проблемой является степень распространения высокоскоростного Интернета [15]. Не во всех регионах существует возможность поддержания необходимого уровня связи, что приводит к потере контроля над автоматизированным грузовиком и может вызвать значительные последствия. Трансформации, аналогичные беспилотным грузовикам, нанесут значительный удар по рабочим местам: на Всемирном экономическом форуме в Давосе в ходе обсуждений начала новой промышленной революции было представлено исследование (на базе 350 крупнейших корпораций), согласно которому в результате трансформации текущей модели производства сокращению будет подвержено более 5 млн рабочих мест вследствие их невосприимчивости [16].

Инновации белорусского автомобилестроения

Вышеупомянутые инновации реализовывались в странах, входящих в топ-25 в The Global Innovation Index-2016. Все они имеют высокий уровень расходов на НИОКР по отношению к ВВП (от 1,2 % и более). Республика Беларусь по итогам 2016 г. имеет 0,4 % (в 2012-м – 0,64 %) – 116-е место в мире по удельному весу расходов на НИОКР в ВВП и 79-е место в глобальном инновационном рейтинге (рис. 6) [17].

Это невысокий результат, однако он не является индикатором отсутствия инновационной составляющей как в Республике Беларусь, так и в автомобилестроительной отрасли в частности.

В середине 2017 г. были представлены первые белорусские электромобили, реализованные на базе Geely CS7 и собранные на мощностях СЗАО «БЕЛДЖИ». Белорусский рынок электромобилей достаточно молод и только начинает делать свои первые шаги. Его развитие, скорее, усилия группы энтузиастов, нежели планомерная, комплексная и командная работа структур, в чьих компетенциях находится данный вопрос.

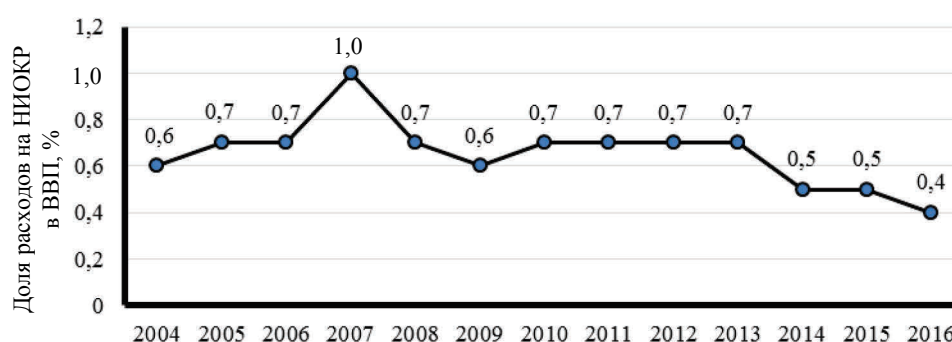


Рис. 6. Удельный вес расходов на НИОКР по отношению к ВВП Республики Беларусь за 2004–2016 гг.
(Источник: UNESCO INSTITUTE FOR STATISTICS)

Fig. 6. Ratio of expenditure on R&D in relation to GDP of the Republic of Belarus for 2004–2016
(Source: UNESCO INSTITUTE FOR STATISTICS)

Развитие электромобилей в Беларуси тормозит прежде всего отсутствие специального законодательства, а также слабые меры стимулирования населения к их покупке. Ключевыми «якорями» являются высокие таможенные платежи (могут достигать до 54 % от стоимости электромобиля), дорогой утилизационный сбор (разница доходит до 10 раз не в пользу электромобилей). Однако направление создания рынка электромобилей – перспективное и будет развиваться стремительными темпами: в соответствии с программой развития зарядной инфраструктуры и электромобильного парка в Беларуси к 2025 г. должно быть не менее 10000 электромобилей [18].

Помимо легковых электромобилей, весной 2017 г. в Беларуси введены в эксплуатацию электробусы, разработанные ОАО «Управляющая компания холдинга «Белкоммунмаш». На данный момент регулярные рейсы выполняют около 20 единиц такой техники. Электробус способен преодолевать до 20 км на одном заряде, время зарядки составляет 7–8 мин [19]. В отличие от украинских коллег (концерн «Электрон» выпускает электробусы с запасом хода более 200 км, но зарядкой 6–7 ч), «Белкоммунмаш» сделал ставку на мобильность, которая помогает стабильно выполнять небольшие по протяженности городские перевозки, но абсолютно не подходит для междугородних перевозок.

Грузовой сегмент также предлагает новые инновационные решения. К примеру, в середине 2016 г. БелАЗ представил новую технологию – лазерную активно-импульсную систему

видения «ЛАИСВ-1». Это совместная разработка управляющей компании холдинга «БелАЗ-Холдинг» и Института физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси. Данная система, в отличие от инфракрасных камер, позволяет формировать качественное изображение в кабине не только в темноте, но и в условиях ограниченной прозрачности атмосферы (снег, туман, дождь и проч.) [20]. Весной 2017 г. ОАО «МАЗ» представило уникальные коммунальные машины, разработанные совместно с европейскими производителями. Высокотехнологичные машины выполняют функции наведения порядка как на дворовых территориях и дорогах, так и в городских стоках. Первая партия машин уже реализована и отправлена в Санкт-Петербург.

ВЫВОДЫ

1. Автомобилестроение восстанавливается после очередного кризиса. В условиях роста рынка на первый план выходят технологии, позволяющие сформировать конкурентные преимущества. Одними из важнейших инновационных направлений развития являются создание экологичного транспорта и цифровая трансформация.

2. Происходящие в автомобилестроительной отрасли трансформации достаточно масштабны. Новые технологии повышения экологичности транспорта возникают и распространяются во многих странах. Миру уже известны успешные проекты: Tesla в легковом автомобилестроении, e-Trucks от Mercedes-Benz

в грузовом. К созданию экологически чистого транспорта подключаются не только игроки автомобильного рынка, но и лидеры иных крупнейших сфер: Alibaba, Google и т. д.

3. Цифровая трансформация также имеет яркие примеры реализации: телематика Volvo Trucks, автоматизированные карьерные самосвалы Rio Tinto. Проекты уже существуют и дают ощутимые преимущества своим разработчикам.

4. Примечательно, что Республика Беларусь не является исключением: белорусские электромобили СЗАО «БЕЛДЖИ», электробусы ОАО «Управляющая компания холдинга «Белкоммунмаш», лазерная активно-импульсная система видения БелАЗ – все это примеры инновационных разработок отечественного автомобилестроения.

5. Несмотря на все имеющиеся ограничения, новая индустриализация набирает обороты и, как было отмечено ранее, текущий темп развития в совокупности с прогнозами экспертов говорит об одном – автомобилестроение переживает не кризисные времена, а вступает в новую реальность, оперативная адаптация к которой станет ключевым конкурентным преимуществом на мировом рынке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Индустриальная революция 4.0 [Электронный ресурс]. PWC. Режим доступа: <https://www.pwc.ru/ru/assets/pdf/industry-4-0-pwc.pdf>. Дата доступа: 23.01.2018.
2. The Third Industrial Revolution – Manufacturing [Electronic resource]. The Economist. 21 April 2012. Mode of Access: <http://www.economist.com/node/21553017>. Date of Access: 06.02.2017.
3. German Trade and Invest [Electronic resource]. GTAI. Mode of Access: https://www.gtai.de/GTAI/Content/EN/Invest/_SharedDocs/Downloads/GTAI/Brochures/Industries/industrie4.0-smart-manufacturing-for-the-future-en.pdf. Date of Access: 06.08.2017.
4. The Truck Industry in 2020: How to Move in Moving Markets [Electronic resource]. Strategy&. Mode of Access: <https://www.strategyand.pwc.com/reports/truck-industry-2020>. Date of Access: 06.08.2017.
5. Alibaba представит умный электромобиль собственной разработки [Электронный ресурс]. Автоцентр. Режим доступа: <https://www.autocentre.ua/news/novinka/alibaba-predstavit-umnyy-elektromobil-sobstvennoy-razrabotki-41016.html>. Дата доступа: 21.10.2017.
6. Apple строит электромобиль [Электронный ресурс]. Apple Insider. Режим доступа: <https://appleinsider.ru/sluxi/smi-apple-stroit-elektromobil.html>. Дата доступа: 21.10.2017.
7. Google выпустит электромобиль-робот без рулевого колеса [Электронный ресурс]. QWRT. Режим доступа: <http://www.qwrt.ru/news/2136>. Дата доступа: 21.10.2017.
8. Electric Vehicles to be 35 % of Global New Car Sales by 2040 [Electronic resource]. Bloomberg New Energy Finance. Mode of Access: <https://about.bnef.com/blog/electric-vehicles-to-be-35-of-global-new-car-sales-by-2040/>. Date of Access: 21.10.2017.
9. Электромобили и «пик нефти» [Электронный ресурс]. Geektimes. Режим доступа: <https://geektimes.ru/post/290539/>. Дата доступа: 13.08.2017.
10. Как переход на электромобили повлияет на выработку электроэнергии в мире и загрязнение воздуха [Электронный ресурс]. Экономические известия. Режим доступа: <http://www.es365.com/uncategorized/>. Дата доступа: 13.08.2017.
11. E-Trucks Rolls in Series [Electronic resource]. Mercedes-Benz Trucks. Mode of Access: <https://www.mercedes-benz.com/en/mercedes-benz/next/e-mobility/e-truck-rolls-in-series/>. Date of Access: 13.08.2017.
12. Waste Management Enters the Digital Revolution [Electronic resource]. Ready for the Resource Revolution. Mode of Access: <http://www.ready-for-the-resource-revolution.com/en/waste-management-enters-the-digital-revolution/>. Date of Access: 20.08.2017.
13. A Digital Revolution is Rapidly Approaching the Truck Industry [Electronic resource]. Volvo Trucks Global. Mode of Access: <http://www.volvotrucks.com/en-en/news-stories/volvo-trucks-magazine/2016/aug/digital-revolution-approaching.html>. Date of Access: 20.08.2017.
14. The Robots Are Coming! Driverless Dozers and the Dawn of Autonomous Vehicle Technology in Construction [Electronic resource]. AUTODESK. Mode of Access: <https://lineshapespace.com/autonomous-vehicle-technology-in-construction/>. Date of Access: 24.08.2017.
15. Автомобилестроение – новые возможности в борьбе за лидерство на мировом рынке [Электронный ресурс]. ТАСС. Режим доступа: <http://tass.ru/pmef-2017/articles/4284698>. Дата доступа: 30.08.2017.
16. The Future of Jobs [Electronic resource]. World Economic Forum. Mode of Access: http://www3.weforum.org/docs/WEF_FOJ_Executive_Summary_Jobs.pdf. Date of Access: 06.08.2017.
17. The Global Innovation Index 2016 [Electronic resource]. World Intellectual Property Organization. Mode of Access: http://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo_publications/gii_2016.pdf. Date of Access: 27.10.2017.
18. Программа развития зарядной инфраструктуры и электромобильного транспорта в Беларуси [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://minenergo.gov.by/wp-content/uploads/2016/06/06-06.docx>. Дата доступа: 23.01.2018.
19. В Минске запустили новый вид транспорта. 10 интересных фактов об электробусах [Электронный ресурс]. Белорусские новости. Режим доступа: <http://naviny.by/article/20170516/1494947256-v-minske-zapustili-novyy-vid-transporta-10-interesnyh-faktov-ob>. Дата доступа: 27.10.2017.
20. Новые технологии на карьерных самосвалах БЕЛАЗ [Электронный ресурс]. БЕЛАЗ. Режим доступа:

http://www.belaz.by/press/news/2016/novie_tehnologii_na_kar_ernih/. Дата доступа: 28.10.2017.

Поступила 26.12.2018

Подписана в печать 05.03.2018

Опубликована онлайн 28.09.2018

REFERENCES

1. Industrial Revolution 4.0. *PWC*. Available at: <https://www.pwc.ru/ru/assets/pdf/industry-4-0-pwc.pdf>. (Accessed 23 January 2018).
2. The Third Industrial Revolution – Manufacturing. *The Economist*. 21 April 2012. Available at: <http://www.economist.com/node/21553017>. (Accessed 6 February 2017).
3. German Trade and Invest. *GTAI*. Available at: https://www.gtai.de/GTAI/Content/EN/Invest/_SharedDocs/Downloads/GTAI/Brochures/Industries/industrie4.0-smart-manufacturing-for-the-future-en.pdf. (Accessed 6 August 2017).
4. The Truck Industry in 2020: How to Move in Moving Markets. *Strategy&*. Available at: <https://www.strategyand.pwc.com/reports/truck-industry-2020>. (Accessed 6 August 2017).
5. Alibaba Will Present a Smart Electric Car of its Own Development. *Autocenter*. Available at: <https://www.auto-centre.ua/news/novinka/alibaba-predstavit-umnyy-elektromobil-sobstvennoy-razrabotki-41016.html>. (Accessed 21 October 2017) (in Russian).
6. Apple is Developing An Electric Car. *Apple Insider*. Available at: <https://appleinsider.ru/sluxi/smi-apple-stroit-elektromobil.html>. (Accessed 21 October 2017) (in Russian).
7. Google Will Manufacture a robotic Electric Car Without Steering Wheel. *QWRT*. Available at: <http://www.qwrt.ru/news/2136>. (Accessed 21 October 2017) (in Russian).
8. Electric Vehicles to be 35 % of Global New Car Sales by 2040. *Bloomberg New Energy Finance*. Available at: <https://about.bnef.com/blog/electric-vehicles-to-be-35-of-global-new-car-sales-by-2040/>. (Accessed 21 October 2017).
9. Electric Cars And “Oil Peak”. *Geektimes*. Available at: <https://geektimes.ru/post/290539/>. (Accessed 13 August 2017) (in Russian).
10. As Transition to Electric Cars Will Influence on Electric-Power Generation in the World and Air Pollution. *Economic News*. Available at: <http://www.es365.com/uncategorized/>. (accessed 13 August 2017) (in Russian).
11. E-Trucks Rolls in Series. *Mercedes-Benz Trucks*. Available at: <https://www.mercedes-benz.com/en/mercedes-benz/next/e-mobility/e-truck-rolls-in-series/>. (Accessed 13 August 2017).
12. Waste Management Enters the Digital Revolution. *Ready for the Resource Revolution*. Available at: <http://www.ready-for-the-resource-revolution.com/en/waste-management-enters-the-digital-revolution/>. (Accessed 20 August 2017).
13. A Digital Revolution is Rapidly Approaching the Truck Industry. *Volvo Trucks Global*. Available at: <http://www.volvotrucks.com/en-en/news-stories/volvo-trucks-magazine/2016/aug/digital-revolution-approaching.html>. (Accessed 20 August 2017).
14. The Robots Are Coming! Driverless Dozers and the Dawn of Autonomous Vehicle Technology in Construction. *AUTODESK*. Available at: <https://linesha.pespace.com/autonomous-vehicle-technology-in-construction/>. (Accessed 24 August 2017).
15. Automotive Engineering – New Possibilities in the Struggle for World Market Leadership. *TASS* [Russian News Agency TASS]. Available at: <http://tass.ru/pmef-2017/articles/4284698>. (Accessed 30 August 2017) (in Russian).
16. The Future of Jobs. *World Economic Forum*. Available at: http://www3.weforum.org/docs/WEF_FOJ_Executive_Summary_Jobs.pdf. (Accessed 6 August 2017).
17. The Global Innovation Index 2016. *World Intellectual Property Organization*. Available at: http://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo_pub_gii_2016.pdf. (Accessed 27 October 2017).
18. Program for Development of Charging Infrastructure and Electric Car Transport in Belarus. Available at: <http://min-energo.gov.by/wp-content/uploads/2/Программа-развития-зарядных-станций-2016-06-06.docx>. (Accessed 23 January 2018) (in Russian).
19. Minsk Has Launched a New Type of Transport. 10 Interesting Facts About Electric Buses. *Belarusian News*. Available at: <http://naviny.by/article/20170516/1494947256-v-minske-zapustili-novy-vid-transporta-10-interesnykh-faktov-ob>. (accessed 27 October 2017) (in Russian).
20. New technologies for BELAZ dump trucks. *BELAZ*. Available at: http://www.belaz.by/press/news/2016/novie_tehnologii_na_kar_ernih/. (Accessed 28 October 2017) (in Russian).

Received: 26.12.2018

Accepted: 05.03.2018

Published online: 28.09.2018

Study of Proportional Pressure Modulator on the Basis of Electromagnetic-Type Linear Motor

M. Yu. Zalohin¹⁾, B. A. Liubarskyi²⁾, S. N. Schuklinov¹⁾, M. G. Mychalevych¹⁾, D. N. Leontiev¹⁾

¹⁾Kharkiv National Automobile and Highway University (Kharkiv, Ukraine),

²⁾National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" (Kharkiv, Ukraine)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Abstract. The paper deals with a workflow of a proportional pressure modulator equipped with a linear electric motor of electromagnetic type (LEMET). A schematic diagram consisting of a power supply and control system has been constructed to determine the performance of LEMET. The power supply system is a self-contained half-bridge inverter. The converter input is supplied with 12 V DC voltage. The motor phase is powered by an inverter which includes transistor switches and diodes. The control system of the autonomous inverter consists of two channels – a current limiting channel and a linear transfer channel. The study is based on the results of numerical and simulation modeling of LEMET workflows. Numerical simulation is performed and investigated by a finite element method in the FEMM environment. Geometry of the LEMET model lies in the region of air with an electromagnetic permeability of 1. An initial radius of the grid generation for the working gap area is 0.5 mm, while for other areas an adaptive generation method has been applied. In order to determine a continuous power function at any point within a current variation interval i and a displacement x current linkage and electromagnetic force functions have been approximated by polynomials use of the Curve Fitting application. The simulation LEMET model of a proportional modulator has been built in the MatLab Simulink environment. The implicit Runge-Kutta method using the second-order inverse differentiation formulas with a variable step has been applied for solution of a mathematical model in the MatLab Simulink system. The equation of an electrical circuit for an inductor motor phase has been compiled according to the second law of Kirchhoff. The LEMET traction characteristics have been obtained by moving a locking and adjusting element (LCE) from 0 to 6 mm in steps of 1 mm while changing the MMF in the winding from 0 to 2 A in steps of 0.1 A. It has been established that in order to move the LCE by 6 mm with the speed of 40 mm/s with a resolution of 0.15 mm, the maximum value of the current in the LEMET winding is equal to 2.5 A. In this case the value of the electromagnetic force is 120 N. This makes it possible to improve an accuracy of the brake drive pressure regulation by 12.3 %. Solutions have been proposed to increase the LEMET speedwork. Characteristics of the engine have been described and numerical parameters of LEMET have been determined in the paper. The developed simulation model allows to investigate functional properties and dynamic characteristics of the proportional modulator with a relative error of 4.07 %.

Keywords: proportional pressure modulator, linear motor of electromagnetic type, finite element method, simulation, workflow

For citation: Zalohin M. Yu., Liubarskyi B. A., Schuklinov S. N., Mychalevych M. G., Leontiev D. N. (2018) Study of Proportional Pressure Modulator on the Basis of Electromagnetic-Type Linear Motor. *Science and Technique*. 17 (5), 440–446. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-440-446>

Исследование пропорционального модулятора давления на основе линейного двигателя электромагнитного типа

Канд. техн. наук, доц. М. Ю. Залогин¹⁾, докт. техн. наук, проф. Б. А. Любарский²⁾,
докт. техн. наук, проф. С. Н. Шуклинов¹⁾, канд. техн. наук, доц. Н. Г. Михалевич¹⁾,
канд. техн. наук, доц. Д. Н. Леонтьев¹⁾

¹⁾Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет (Харьков, Украина)

²⁾Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» (Харьков, Украина)

Реферат. Проведено исследование рабочего процесса пропорционального модулятора давления с линейным электродвигателем электромагнитного типа (ЛЭДЭТ). Для определения рабочих характеристик ЛЭДЭТ составлена принци-

Адрес для переписки

Залогин Максим Юрьевич
Харьковский национальный
автомобильно-дорожный университет
ул. Ярослава Мудрого, 25,
61002, г. Харьков, Украина
Тел.: +375 057 707-37-69
zalogin@khadi.kharkov.ua

Address for correspondence

Zalohin Maksim Yu.
Kharkiv National
Automobile and Highway University
25 Yaroslava Mudrogo str.,
61002, Kharkov, Ukraine
Tel.: +375 057 707-37-69
zalogin@khadi.kharkov.ua

пиальная схема, состоящая из системы питания и управления. Система питания представляет собой автономный полумостовой инвертор. На вход преобразователя подается постоянное напряжение 12 В. Фаза двигателя питается от инвертора, в состав которого входят транзисторные ключи и диоды. Система управления автономным инвертором состоит из двух каналов – канала ограничения тока и канала линейного перемещения. Исследование основано на результатах численного и имитационного моделирования рабочих процессов ЛЭДЭТ. Численное моделирование выполнено и исследовано методом конечных элементов в среде FEMM. Геометрия модели ЛЭДЭТ заключена в область воздуха с электромагнитной проницаемостью, равной 1. Начальный радиус генерации сетки для области рабочего зазора составляет 0,5 мм, а для других областей установлен адаптивный метод генерации. Для определения непрерывной степенной функции в любой точке интервала варьирования тока i и перемещения x функции потокоцепления и электромагнитной силы аппроксимированы полиномами при помощи приложения Curve Fitting. Имитационная модель ЛЭДЭТ пропорционального модулятора построена в среде MatLab Simulink. Для решения математической модели в системе MatLab Simulink выбран неявный метод Рунге – Кутты, использующий формулы обратного дифференцирования 2-го порядка с переменным шагом. Уравнение электрической цепи фазы индукторного двигателя составлено согласно второму закону Кирхгофа. Тяговые характеристики ЛЭДЭТ получены путем перемещения запорно-регулирующего элемента (ЗРЭ) от 0 до 6 мм с шагом 1 мм при изменении магнито-движущей силы (МДС) в обмотке от 0 до 2 А с шагом 0,1 А. Установлено, что для перемещения ЗРЭ на 6 мм при скорости 40 мм/с с дискретностью 0,15 мм максимальное значение силы тока в обмотке ЛЭДЭТ равно 2,5 А. При этом значение электромагнитной силы равно 120 Н. Это позволяет повысить точность регулирования давления в тормозном приводе на 12,3 %. Предложены решения, повышающие быстродействие ЛЭДЭТ. Описаны характеристики двигателя и определены численные параметры ЛЭДЭТ. Разработанная имитационная модель позволяет исследовать функциональные свойства и динамические характеристики пропорционального модулятора с относительной погрешностью 4,07 %.

Ключевые слова: пропорциональный модулятор давления, линейный двигатель электромагнитного типа, метод конечных элементов, моделирование, рабочий процесс

Для цитирования: Исследование пропорционального модулятора давления на основе линейного двигателя электромагнитного типа / М. Ю. Залогин [и др.] // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 5. С. 440–446. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-440-446>

Introduction

It is a well-known fact that the development of measures to improve the structural safety of the car has a global character nowadays. The reason for this is the increasing complexity of road traffic, which in turn poses problems to the driver while steering the car that one may not always be able to cope with. The above problems can only be solved by on-board computer systems, since other administrative measures do not lead to sustained decline in the number and complexity of accidents. In this regard, on-board computer systems, processing the streaming information, can systemize it, record it, and if there is a necessity, provide or modify the appropriate steps in the light of prevailing traffic conditions. From this point of view, the most modern braking system is the electro-pneumatic brake system (EPBS). The air pressure in the brake circuits of such a system is formed by electronic control pressure modulators. The control is carried out by means of electronics based on sensor information included in the configuration of any automated system. The quality of control is determined by the executive devices (modulators) whose structure many parameters of traffic safety depend

upon. Increasing the speed of modulators helps in solving a number of technical problems, while improving their design leads to the reduction of the cost of production of brake equipment and the brake system as a whole.

Analysis of publications

The works of A. K. Alexander, L. V. Gurevich, A. I. Popova; L. A. Ryzhykh [1], D.N. Leontiev [2] deal with the creation and improvement of EPBS. At the Automobile Department of KhNAHU there was developed and introduced into manufacture a proportional modulator EPBS designed on the basis of a rotary electric stepper motor FL57STH76-2084B with a gear-train rack pinion. It is established that the range of the rotary stepper electric motor operation in the proportional modulator is very narrow, which is irrational. To address this shortcoming, in this paper it is proposed to apply a gearless drive based on the linear electric motor of the electromagnetic type (LEMET). Drives based on the linear electric motor of the electromagnetic type are widespread in the field of railway technology for drives of the body tilt systems of high speed electric rolling stock [3], and in the switches of sleeper type [4].

Goal and problem statement

The aim of the given work is to determine the possibility of using in the pressure modulator of the electro-pneumatic brake system a linear electric motor of electromagnetic type.

To achieve this goal it is necessary to solve the following tasks: to develop a mathematical model of linear electromagnetic motor; to develop a mathematical model of the proportional pressure modulator with a linear electric motor of the electromagnetic type; perform a simulation study of the workflow of proportional pressure modulator with a linear stepper electric motor.

Modeling of working processes is proportional to the pressure modulator

To select the main parameters of the proportional modulator with a linear electric motor of the electromagnetic type as well as build its static characteristics, the following initial data is required: z – increment of the locking control element (LCE); t – time of the full stroke of the shut-off control element.

Discreteness of the locking control element displacement is determined by the dependence of the locking control element displacement and outlet pressure. In the traditional proportional (servo) machines, namely, in brake valves, the gradation of the output pressure is one of the indicators of pneumatic actuator quality. Regulations are not proposed. There is no specified gradation change of the output pressure in proportional devices. Pro-

ceeding from other recommendations, the permissible value of the pressure degree in the pneumatic brake actuator should not exceed 3–4 % of the maximum pressure and 0.02 MPa [5, 6].

Thus, the discrete displacement of the locking control element can be determined by the following formula.

$$z = \frac{P_{\max}}{P_{\deg}}, \quad (1)$$

where $P_{\max}$ – the maximum pressure in the actuator; $P_{\deg}$ – measure of the degree of change in pressure.

The minimal time of the locking control element turn in serial brake valves is determined by the time of brake-pedal actuation during emergency braking, which is regulatory established to be 0.2 s [5, 7]. Thus, the maximum travel time of LCE in the proportional modulator shall not exceed 0.2 s and the minimum time is limited by the inertial parameters of the linear electric motor of electromagnetic type. The design scheme is proportional to the pressure modulator with a linear stepper electric motor shown in fig. 1.

The mathematical model of the linear electric motor of the electromagnetic type consists of equations of electric circuits and the movement of armature. The equations of the electric circuit describe the workflow of the linear electric motor of electromagnetic type whose phases are based on the solution of the Lagrange equations for electromechanical systems [8, 9].

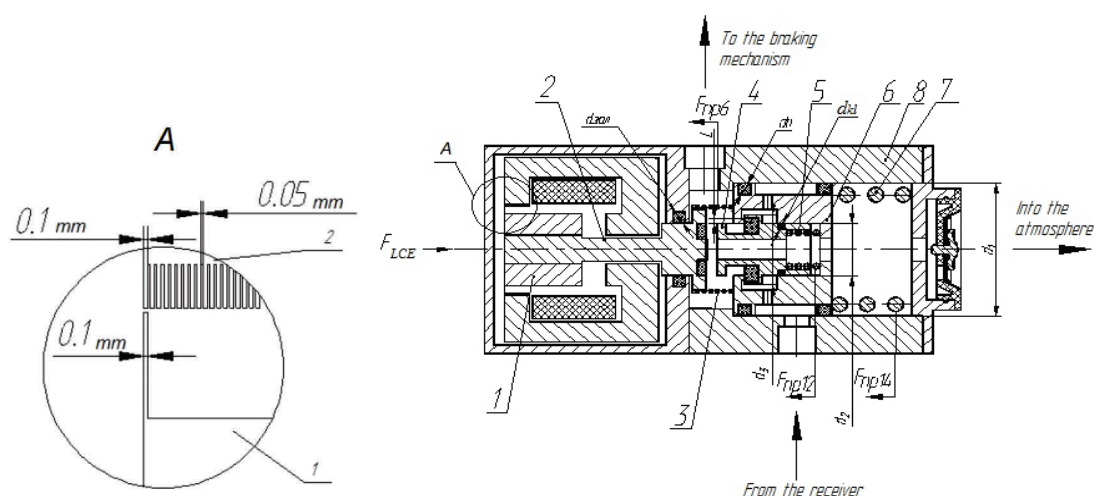


Fig. 1. Analytical model of proportional modulator:

- 1 – anchor, LEET; 2 – LSE rod; 3 – return spring; 4 – double-seat valve; 5 – spring of double-seat valve; 6 – follow-up air piston; 7 – follow-up air piston spring; 8 – case of modulator

Transforming it with respect to the derivative of the current, we obtain the differential equation of the first order in the form of:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U - iR - vK}{L}, \quad (2)$$

where U – voltage; i – current strength; R – resistance of the winding field; v – linear speed; $K = \partial\psi/\partial x$ – private derivative of the flux linkage to move x , at constant current i ; $L = \partial\psi/\partial i$ – partial derivative of the flux linkage according to current i , at constant displacement of x ; ψ – flux linkage of the motor phase.

According to the Newton's second law, the equation of armature motion takes the following form:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{F_e - F_s}{m}, \quad (3)$$

where m – is the mass of the moving parts of the proportional modulator; F_e – is the electromagnetic force of the linear electric motor of electromagnetic type; F_s – is the force of resistance.

Expressions for determining the flux linkage ψ and its derivatives according to the current and the displacement, as well as the electromagnetic force F_e are the functions of linear displacement x and the current i :

$$\psi = f(x, i); \quad F_e = f(x, i). \quad (4)$$

The definition of parameters ψ , L , K , F_e are performed using the finite element method and the subsequent regression analysis. Modeling and study of LEMET of the proposed design was carried out in the FEMM environment [10]. When building the model, the following basic parameters and assumptions were taken into account: the magnetic system is axially symmetric; the body material and the motor armature is made of steel 2020, the stator winding is made of copper with MDS 1000 A; the eddy currents and hysteresis in the magnetic core are not taken into account, the keys of the converter have ideal current-voltage characteristics [11–13]. The estimated area of LEMET is limited to a sphere (fig. 2a, item 4) filled with air. On the border of region A they set the boundary condition of Dirichlet [3]. This makes it possible to keep the magnetic flux within this area. Finally, the total force is determined by integrating the differential force on the loop around the anchor. This contour is automatically determined by the software package FEMM. As a result of generation of the finite element mesh the model contains 25798 nodes and 51528 elements (fig. 2b). To obtain a family of traction characteristics LEMET, they carried out a set of numerical experiments by varying the movement of LCE and the anchor x in the range from 0.1 to 8.0 mm with increments of 0.1 mm and with the current change in the coil from 0 to 2 in increments of 0.1 A.

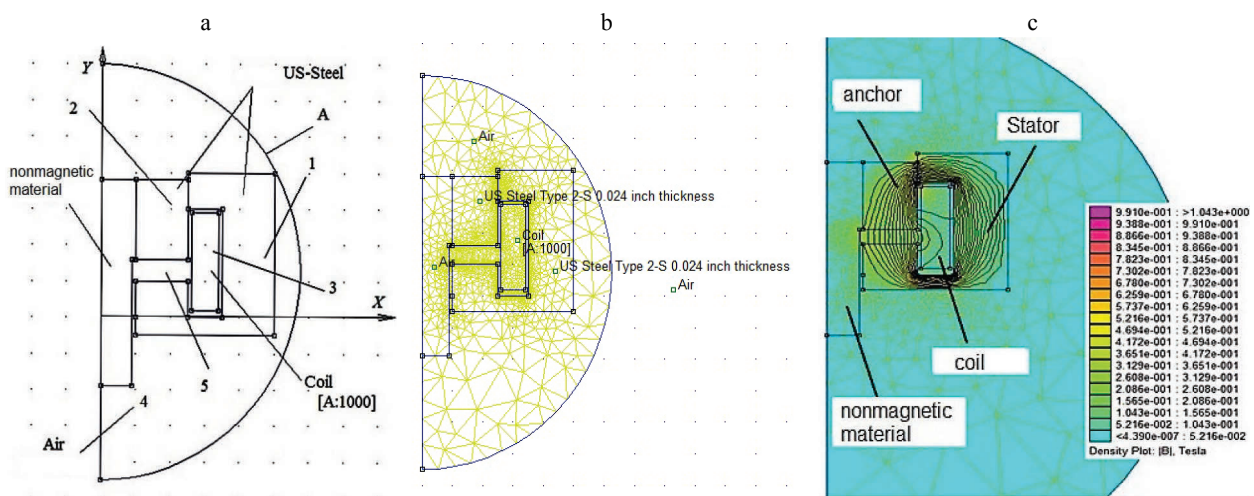


Fig. 2. Finite element model of LEMET

At each step of calculation they carried out automatic calculation of the electromagnetic field (fig. 2c), the magnitude of the traction force F_e and the flux linkage ψ for the current value i and displacement x . The values of these parameters were measured according to the method presented in [11].

Using the MatLab Curve Fitting application, regression analysis was carried out and the continuous dependence of functions $\psi = f(x, i)$ and $F_e = f(x, i)$, in the form of polynomials 4 and 5 degree was, respectively, obtained. Then, the partial derivatives of the flux linkage according to the movement (K) and current (L) were determined analytically.

A simulation model of the actuator of proportional modulator on the basis of the linear electric motor of electromagnetic type was built in the MatLab Simulink environment, which reflects the consistent transfer of energy from the power source to the executive element – LSE, given the law of the input signal and structural parameters of the linear stepper motor (fig. 3). It contains: the unit INVERTOR simulating the operation of the inverter and the control system of the drive, the unit ID_EL describing the work of energy transformation in the LEMET and MEHANIKA block in which they simulate a dynamic process of the mechanical part of the drive.

To solve the mathematical model in the MatLab Simulink system, the implicit Runge-Kutt method using the reverse differentiation formula of the 2nd order as well as in the further solution with a variable pitch [8] was chosen. The simulation time constituted $t = 0.5$ s. The integration step was equal to 10^{-9} . The current analysis of dynamic processes in the given model was performed using Scope blocks. To analyze and evaluate the dynamic dependencies in the function on parameters of the modulator the simulation results are

stored as a dataset in an Excel file, using the blocks To Workspace. The results of simulation of the workflow of proportional modulator reflects the dependence of the force F_e , the displacement x , and the current i in the modulator on the time t .

Fig. 4a shows the dependence $F = f(t)$ at different maximum speeds of movement of the rod LSE 20 mm/s and 40 mm/s, respectively. The graph shows that the maximum value of the force which is required to overcome the resistance forces is achieved during 0.2 seconds with maximum speed of 40 mm/s and varies in proportion to the resistance force F_c . While analyzing the characteristics of the workflow, it was established that at the maximum set speed of movement of LSE 20 mm/s, the output of operational performance relative the established procedure increased by 34.8 %.

The dynamic fluctuations that occur in the established mode, testify to the automatic adjustment of the workflow characteristics that is a consequence of PID controller application in the simulation model. Fig. 4b reflects the graph of dependence $x = f(t)$. The figure shows that a full stroke of LSE is achieved within 0.2 s, which corresponds to the requirements of normative documents [14]. Fluctuations that are observed in the established mode occur within 0.1 mm, which practically does not affect the working process of the electropneumatic braking system, as they are in the dead zone of the actuator.

Fig. 4c shows the dependence $i = f(t)$. The graph indicates that in the mode of gathering the power, as well as actuation of the locking and regulating element, the maximum value of the current is 2.5 A, which is 20 % higher than the calculated value. This suggests that at the initial stage of designing a linear stepper motor, one has to calculate its operational performance for the maximum current of 3–4 A.

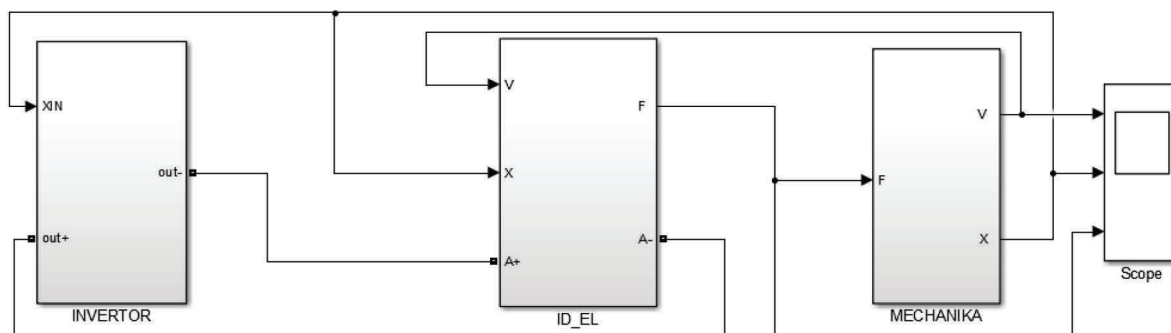


Fig. 3. Simulation model of LEMET drive

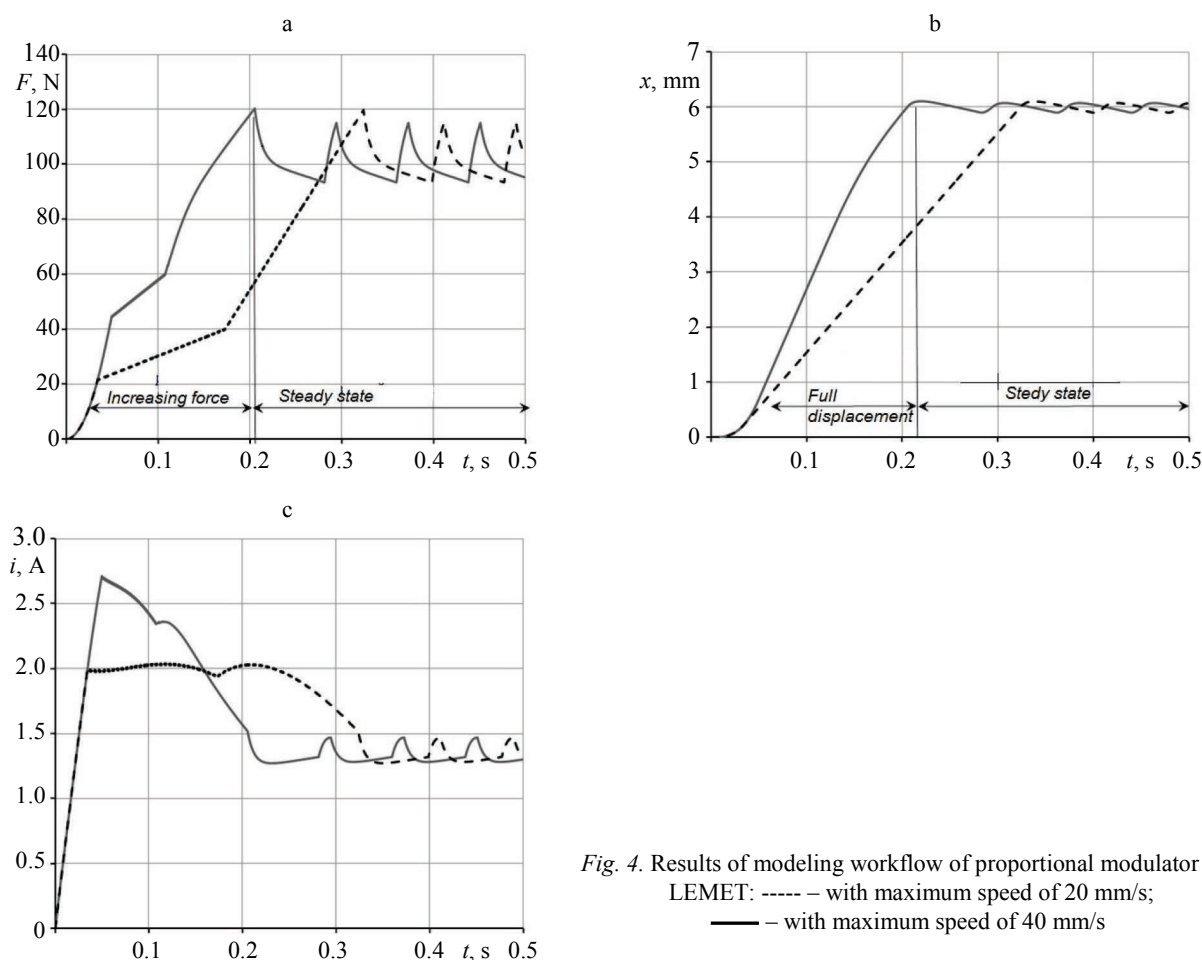


Fig. 4. Results of modeling workflow of proportional modulator with LEMET: ----- – with maximum speed of 20 mm/s; — – with maximum speed of 40 mm/s

It is also clear that at a steady state, the value of the current is reduced by about 40 %. In the result of theoretical study, the physical model of the LEMET drive of the proportional pressure modulator is developed with the following parameters: the discrete displacement of LCE z equals 0.15 mm, and allows to adjust the accuracy of pressure regulation in the brake system by 4.5 %; the power delivered to the drive of the linear motor of electromagnetic type is not more than 30 W, which allows to economize the electric power of the car by 17.2 %.

CONCLUSIONS

1. Theoretical studies of the physical model of the linear stepper motor of the brake system modulator made it possible to increase the accuracy of pressure regulation by 4.5 %. At the same time, the economy of the vehicle electricity consti-

tuted 17.2 % in comparison with the stepper motor described in [1].

2. It is established that at the maximum speed of movement of the regulating element of the linear stepper motor, the speed of more than 0.2 sec is achieved. It was also revealed that the speed increased by 35 %.

3. To overcome the resistance forces in the modulator at the maximum speed of movement of regulating element of 40 mm, it is necessary to create an electromagnetic force of 120 N.

4. On the whole, the performed simulation studies showed that the developed mathematical model makes it possible at the stage of preliminary design to analyze the effects of various parameters on the performance and dynamic characteristics of the proportional pressure modulator with a linear motor of the electromagnetic type. The expediency of the linear electric motor of the electromagnetic type application and the relative error of the results of investigation of 4.07 % are established.

REFERENCES

1. Ryzhikh L. A., Leontiev N. (2011) Peculiarities of Electronic Pneumatic Brake System of Transport Facilities. *Avtomobil'nyi Transport: Sbornik Nauchnykh Trudov = Automobile Transport: Scientific Papers Collection*. Kharkiv, Kharkiv National Automobile and Highway University, (29), 68–70 (in Russian).
2. Leont'ev D. N., Serikova E. A., Bykadarov A. V., Don E. Yu. (2012) Analysis and Selection of Principles to Control Electro-Pneumatic Modulators of Primary Braking Systems in Vehicles. *Visnik Natsional'nogo Tekhnichnogo Universitetu «Kharkivs'kii Politekhnicnii Institut». Seriya: Avtomobile- ta Traktorobuduvannya = Bulletin of National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute". Series: "Automobile and Tractor Construction"*, (60), 67–72 (in Russian).
3. Yeritsyan B. Kh., Liubarsky B. G., Yakunin D. I. (2016) Modeling of Combined System to Tilt Body of High Speed Rolling Stock of Railway Transport. *Skhidno-Evropeis'kii Zhurnal Peredovikh Tekhnologii = Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 80 (9), 4–17 (in Ukrainian).
4. Buryakovskii S. G., Maslii Ar. S., Lyubarskii B. G., Maslii An. S. (2015) Mathematical Model for Operation of Electric Actuator in Assembly Switch on the Basis of Linear Motor. *Informacijno-Keruuci Sistemi na Zaliznicnomu Transporti = Information and Control Systems at Railway Transport*, (3), 59–65 (in Ukrainian).
5. Thoms E. K. (1983) The Human Aspect in the Design of Footbrake Valve. *Braking of Road Vehicle: Conf. Proc.* London, 59–64.
6. Mikhalevich N. G., Turenko A. N., Bogomolov V. A., Klimenko V. I., Ryzhikh L. A., Leont'ev D. N., Krasnyuk A. N. (2015) *Realization of Intellectual Functions in Electronic-Pneumatic Braking Control of Vehicles*. Kharkiv, Kharkiv National Automobile and Highway University. 450 (in Russian).
7. Lomaka S. I., Ryzhikh L. A., Leont'ev D. N., Cheban A. A., Krasnyuk A. N. (2009) Automatic Control Systems and Practical Implementation of Algorithm for Controlling their Executing Mechanisms. *Visnik Natsional'nogo Tekhnichnogo Universitetu «Kharkivs'kii Politekhnicnii Institut». Seriya: Transportnoe mashinostroenie = Bulletin of National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute". Series: Transport engineering*, (47), 9–18 (in Russian).
8. Chernykh I. V. (2007) *Simulation of Electrical Devices in MatLab. SimPowerSystem and Simulink*. Moscow, DMK Press Publ.; St. Petersburg, Piter Publ. 288 (in Russian).
9. White D., Woodson G. (1959) *Electromechanical Energy Conversion*. Wiley. 646.
10. Information on <http://femm.berlios.de>.
11. Lyubarskii B. G., Severin V. P., Parfenyuk T. V., Zyzin D. Yu., Glebova M. L., Gordeeva N. A. (2010) Simulation Modeling of Electric Drive on the Basis of Linear Step Motor Drive. *Visnik Natsional'nogo Tekhnichnogo Universitetu «Kharkivs'kii Politekhnicnii Institut». Seriya: Transportnoe mashinostroenie = Bulletin of National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute". Series: Transport Engineering*, (38), 62–71 (in Russian).
12. Meeker D. (2013) Finite Element Method Magnetics. *Magnetics Tutorial*. Available at: <http://www.femm.info/wiki/MagneticsTutorial>.
13. Sylvester P. P. (1996) *Finite Elements for Electrical Engineers*. Cambridge University Press. 495. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139170611>.
14. DSTU [State Standards of Ukraine] 3649–97. *Road Vehicles. Operational Safety Requirements to Technical Conditions and Control Methods*. Kyiv: Publishing House "Derzhstandart Ukrainy", 1998. 13 (in Ukrainian).

Received: 09.10.2017

Accepted: 16.03.2018

Published online: 28.09.2018

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыжих, Л. А. Особенности электронно-пневматической тормозной системы транспортных средств / Л. А. Рыжих, Д. Н. Леонтьев // Автомобильный транспорт: сб. науч. трудов. Харьков: Харьковский национальный автомобильно-дорожный ун-т, 2011. № 29. С. 68–70.
2. Анализ и выбор принципов управления электропневматическими модуляторами рабочей тормозной системы автомобилей / Д. Н. Леонтьев [и др.] // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Сер. Автомобіле- та тракторобудування. 2012. № 60. С. 67–72.
3. Єрціян, Б. Х. Моделювання комбінованої системи нахилу кузову швидкісного рухомого складу залізничного транспорту / Б. Х. Єрціян, Б. Г. Любарський, Д. І. Якунін // Східно-Європейський журнал передових технологій. 2016. Т. 80, № 9. С. 4–17.
4. Математична модель роботи електропривода стрілочного переводу на базі лінійного двигуна / С. Г. Буряковський [и др.] // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2015. № 3 С. 59–65.
5. Thoms, E. K. The Human Aspect in the Design of Footbrake Valve / E. K. Thoms // Braking of Road Vehicle: Conf. Proc. London, 1983. P. 59–64.
6. Реализация интеллектуальных функций в электронно-пневматическом тормозном управлении транспортных средств / А. Н. Туренко [и др.]. Харьков: ХНАДУ, 2015. 450 с.
7. Системы автоматического регулирования и практическая реализация алгоритма управления их исполнительными механизмами / С. И. Ломака [и др.] // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Сер. Транспортне машиностроение. 2009. № 47. С. 9–18.
8. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystem и Simulink / И. В. Черных. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.
9. Уайт, Д. Электромеханическое преобразование энергии / Д. Уайт, Г. Вудсон. М.: Энергия, 1964. 528 с.
10. Information on <http://femm.berlios.de>.
11. Имитационное моделирование электропривода на базе линейного шагового привода / Б. Г. Любарский [и др.] // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Сер. Транспортне машиностроение. 2010. № 38. С. 62–71.
12. Meeker, D. Finite Element Method Magnetics [Electronic resource] / D. Meeker. 2013. Magnetics Tutorial. Available at: <http://www.femm.info/wiki/MagneticsTutorial>.
13. Sylvester, P. P. Finite Elements for Electrical Engineers / P. P. Sylvester. Cambridge University Press, 1990.
14. ДСТУ 3649–97: Засоби транспортні дорожні. Експлуатаційні вимоги безпеки до технічного стану та методи контролю. Київ: Держстандарт України, 1998. 13 с. (Національний стандарт України).

Поступила 09.10.2017

Подписана в печать 16.03.2018

Опубликована онлайн 28.09.2018