

НАУКА и ТЕХНИКА

**Международный
научно-технический журнал**

Издается с января 2002 года
Периодичность издания –
один раз в два месяца

Учредитель
Белорусский
национальный технический
университет



SCIENCE and TECHNIQUE

**International
Scientific and Technical Journal**

Published from January 2002
Publication frequency –
bimonthly

Founder
Belarusian
National Technical
University

Vol. 20 / No 1 / 2021

Журнал включен в базы данных:
Web of Science (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE,
Google Scholar, РИНЦ, ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет

The Journal is included in the following databases:
Web of Science (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE,
Google Scholar, RISC, Lan, CyberLeninka, Socionet

СОДЕРЖАНИЕ

Строительство

- Leonovich S. N., Riachi J.**
3D-Modeling for Life Cycle of the Structure
(Леонович С. Н., Риачи Ж.
3D-моделирование для жизненного цикла
сооружения) 5
- Ходяков В. А., Кулан А. В., Савина Е. Н.,
Бойко И. Л., Гречухин В. А.**
Диагностика участков мостового полотна
и подходов в зонах устройства
деформационных швов
на автодорожных мостах 10
- Лукашевич А. А., Лукашевич Н. К.,
Островская Н. В.**
Моделирование и численное решение задачи
с односторонними связями и трением
при динамическом действии нагрузки 16

Транспорт

- Kharytonchyk S. V., Kussyak V. A., Nghia Le Van**
Control of Pneumatic Actuator for Automated
Mechanical Transmission Dry Friction Clutch Base
on the Pulse Width Modulation Signal
(Харитончик С. В., Кусяк В. А., Нгиа Ле Ван
Управление пневматическим исполнительным
механизмом сухого фрикционного сцепления
автоматизированной механической трансмиссии
на основе модулированного
широотно-импульсного сигнала) 26

CONTENTS

Civil Engineering

- Leonovich S. N., Riachi J.**
3D-Modeling for Life Cycle of the Structure 5
- Hodyakov V. A., Kulan A. V., Savina E. N.,
Boiko I. L., Grechuhin V. A.**
Diagnostics of Bridge Bed
Sections and Approaches
in Zones of Expansion Joints
on Road Bridges 10
- Lukashevich A. A., Lukashevich N. K.,
Ostrovskaya N. V.**
Modelling and Numerical Solution
of the Problem with Unilateral Constraints
and Friction under Dynamic Action of the Load ... 16

Transport

- Kharytonchyk S. V., Kussyak V. A., Nghia Le Van**
Control of Pneumatic Actuator for Automated
Mechanical Transmission Dry Friction Clutch Base
on the Pulse Width Modulation Signal 26

Boikov V. P., Guskov V. V., Pavarekha A. S. Automated Tire Pressure Control System for Multi-Purpose Wheeled Vehicles (Бойков В. П., Гуськов В. В., Поварехо А. С. Автоматизированная система регулирования давления воздуха в шинах многоцелевых колесных машин)	33
Domijanic M., Hirz M. Simulation Model for Drivability Assessment and Optimization of Hybrid Drive Trains (Домијанич М., Хирц М. Имитационная модель для оценки управляемости автомобилем и оптимизация гибридной силовой установки)	37
Ibrayev K., Kapskiy D., Bogdanovich S. Ways to Improve Road Safety Audit in the Republic of Kazakhstan (Ибраев К., Капский Д., Богданович С. Пути повышения качества аудита безопасности дорожного движения в Республике Казахстан)	45
Herasymenko V., Shpika N., Smyrnyi M., Khuruzha D. Improving the Energy Performance of Traction Electric Drive Vehicles in Solving Electric Braking (Герасименко В., Шпика Н., Смирный М., Хуружа Д. Повышение энергетических характеристик тяговых электромобилей в решении проблемы электрического торможения)	52

Энергетика

Хрусталеv Б. М., Пехота А. Н., Нгуен Тху Нга, Vu Minh Phap Твердое топливо на основе отходов малоиспользуемых горючих энергоресурсов	58
---	----

Экономика промышленности

Грахов В. П., Кузнецов А. Л., Кислякова Ю. Г., Симакова У. Ф., Князева Я. О. Внедрение цифрового управления проектами строительства и эксплуатации энергоэффективных жилых домов	66
Чазов Е. Л., Грахов В. П., Симченко О. Л. Методический инструментарий оценки эффективности проектов капитального строительства нефтедобывающих предприятий	75
Тымуль Е. И. Выбор метода качественного и количественного анализа рисков для предприятий энергетики	83

Boikov V. P., Guskov V. V., Pavarekha A. S. Automated Tire Pressure Control System for Multi-Purpose Wheeled Vehicles	33
Domijanic M., Hirz M. Simulation Model for Drivability Assessment and Optimization of Hybrid Drive Trains	37
Ibrayev K., Kapskiy D., Bogdanovich S. Ways to Improve Road Safety Audit in the Republic of Kazakhstan	45
Herasymenko V., Shpika N., Smyrnyi M., Khuruzha D. Improving the Energy Performance of Traction Electric Drive Vehicles in Solving Electric Braking	52

Power Engineering

Khrustalev B. M., Pekhota A. N., Nguyen Thuy Nga, Vu Minh Phap Solid Fuel Based on Waste of Low-Utilized Combustible Energy Resources	58
--	----

Economy in Industry

Grakhov V. P., Kuznecov A. L., Kislyakova Yu. G., Simakova U. F., Knyazeva Y. O. Implementation of Digital Project Management for Construction and Operation of Energy-Efficient Residential Buildings	66
Chazov E. L., Grakhov V. P., Simchenko O. L. Methodological Tools for Evaluating Effectiveness of Capital Construction Projects of Oil Producing Enterprises	75
Tymul E. I. Choosing Method for Qualitative and Quantitative Risk Analysis for Energy Enterprises	83

Главный редактор
Борис Михайлович Хрусталеv

Редакционная коллегия

- Алексеев Ю. Г.** (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь), заместитель главного редактора,
- Белый А. В.** (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- Бисби Л.** (Эдинбургский университет, Эдинбург, Соединенное Королевство Великобритании и Северной Ирландии),
- Виттманн Ф. Х.** (Швейцарская высшая техническая школа Цюриха, Цюрих, Швейцарская Конфедерация),
- Дидерихс У.** (Ростокский университет, Росток, Федеративная Республика Германия),
- Дмитриев С. М.** (Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация),
- Згуровский М. З.** (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина),
- Кондерс А. Б.** (Дармштадтский технический университет, Дармштадт, Федеративная Республика Германия),
- Косёр-Казберук М.** (Белостокский технический университет, Белосток, Республика Польша),
- Леонович С. Н.** (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь), заместитель главного редактора,
- Лю Тингуо** (компания «Гаоюань», провинция Хэнань, Китайская Народная Республика),
- Макнами Р. Я.** (Консультационное агентство по вопросам пожарной безопасности, Стокгольм, Королевство Швеция),
- Максаров В. В.** (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация),
- Нгуен Тху Нга** (Научный энергетический институт, Вьетнамская академия наук и технологий, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),
- Одиназода Х. О.** (Таджикский технический университет имени академика М. С. Осими, Душанбе, Республика Таджикистан),
- Опеляк М.** (Люблинский технический университет, Люблин, Республика Польша),
- Пенязьков О. Г.** (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),

Editor-in-Chief
Boris M. Khroustalev

Editorial Board

- Aliakseyeu Yu. G.** (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus), Deputy Editor-in-Chief,
- Byeli A. V.** (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- Bisby L.** (University of Edinburgh, Edinburgh, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland),
- Wittmann F. H.** (ETH – Swiss Federal Institute of Technology Zürich, Zürich, Swiss Confederation),
- Diederichs U.** (University of Rostock, Rostock, Federal Republic of Germany),
- Dmitriev S. M.** (Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation),
- Zgurovsky M. Z.** (National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine),
- Koenders A. B.** (Technical University of Darmstadt, Darmstadt, Federal Republic of Germany),
- Kosior-Kozberuk M.** (Bialystok University of Technology, Bialystok, Republic of Poland),
- Leonovich S. N.** (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus), Deputy Editor-in-Chief,
- Liu Tingguo** (Gaoyuan Company, Henan Province, People’s Republic of China),
- McNamee R. J.** (Brandskyddslaget AB, Stockholm, Kingdom of Sweden),
- Maksarov V. V.** (Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation),
- Nguyen Thu Nga** (Institute of Energy Science, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Socialist Republic of Vietnam),
- Odinazoda H. O.** (Tajik Technical University named after Academic M. S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan),
- Opielak M.** (Lublin University of Technology, Lublin, Republic of Poland),
- Penyazkov O. G.** (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),

Пимьента П. (Научно-технический центр строительной отрасли, Сен-Мартен-д'Эр, Французская Республика),
Родригес Ж. П. К. (Коимбрский университет, Коимбра, Португальская Республика),
Романюк Ф. А. (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Сидерис К. (Фракийский университет имени Демокрита, Комотины, Греческая Республика),
Соболев К. (Университет Висконсин-Милуоки, Милуоки, Соединенные Штаты Америки),
Сумров В. В. (компания «Интернет Коммуникаций Девелопмент Групп Лимитед», Рига, Латвийская Республика),
Феличетти Р. (Миланский технический университет, Милан, Итальянская Республика),
Чжао Цзи (Северо-Восточный университет, Шэньян, Китайская Народная Республика),
Чижик С. А. (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
Шелег В. К. (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь), заместитель главного редактора,
Ши Ли И (Научно-технологический парк Шанхайского университета, Шанхай, Китайская Народная Республика),
Эберхардштайнер Й. (Венский технический университет, Вена, Австрийская Республика),
Янковский А. (Технологический институт ВВС, Варшава, Республика Польша)

Ответственный секретарь редакционной коллегии
В. Г. Горбаш

Pimienta P. (Scientific and Technical Centre for the Building – CSTB Department, Saint-Martin-d'Hères, French Republic),
Rodrigues J. P. C. (University of Coimbra, Coimbra, Portuguese Republic),
Romaniuk F. A. (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
Sideris K. (Democritus University of Thrace, Komotini, Hellenic Republic),
Sobolev K. (University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, United States of America),
Sumrov V. V. (Internet Communication Development Group Ltd – ICD, Riga, Republic of Latvia),
Felicetti R. (Polytechnic University of Milan, Milan, Italian Republic),
Zhao Ji (Northeastern University, Shenyang, People's Republic of China),
Chizhik S. A. (National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
Sheleg V. K. (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus), Deputy Editor-in-Chief,
Shi Li Yi (Science and Technology Park of Shanghai University, Shanghai, People's Republic of China),
Eberhardsteiner J. (Vienna University of Technology, Vienna, Republic of Austria),
Jankowski A. (Air Force Institute of Technology, Warsaw, Republic of Poland)

Executive Secretary of Editorial Board
V. G. Gorbash

Ведущий стилистический редактор

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>

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 27.01.2021. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 11,25. Уч.-изд. л. . Тираж 150 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, 2021

Leading Style Editor

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>

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-5-9>

UDC 624.94.014

3D-Modeling for Life Cycle of the Structure

S. N. Leonovich¹⁾, J. Riachi¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Abstract. Owners and construction management are in permanent search to increase competitiveness, reduce cost and time and maintain a high quality of products and services. In this objective project management tend to organize work execution by implementing comprehensive, linked and sequential processes, making full use of every work effort and limiting work duplication and rework. Since the '90s, the 3D-modeling is used to coordinate, plan, build and manage future structures. The BIM approach proposes to stakeholders to participate in an intelligent centrally shared 3D-model making use of every contribution to this model, facilitating the coordination, solving the interfaces, reducing duplication efforts and carrying the developed data information throughout the life cycle of the structure and beyond the construction phase. Completing a complex structure requires an important level of design management and coordination of the interface between architect, designer, mechanic, electrician, and other designers. Basic input is required from equipment suppliers. Now, for a good reason, everyone in charge of the process is focused on achieving their process with less cost and less time. Thus, he inadvertently reduces the effort associated with surrounding or subsequent actions, and focuses on his main result. For example, structural engineering developing a 3D-model will focus on clean structural design focusing on structural continuity, geometry identification, and calculation model for finite elements of software. Likewise, a mechanical engineer will model plumbing and mechanical networks for fabrication and installation purposes. It is the same with other design disciplines.

Keywords: 3D-modeling, life cycle, building information model (BIM)

For citation: Leonovich S. N., Riachi J. (2021) 3D-Modeling for Life Cycle of the Structure. *Science and Technique*. 20 (1), 5–9. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-5-9>

3D-моделирование для жизненного цикла сооружения

Докт. техн. наук, проф. С. Н. Леонович¹⁾, магистр техн. наук Ж. Риачи¹⁾

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

Реферат. Собственники и руководители строительства находятся в постоянном процессе повышения конкурентоспособности, сокращения затрат и времени, поддержания высокого качества продукции и услуг. Цель управления проектами – организовать выполнение работ путем реализации комплексных, связанных и последовательных мероприятий, в полной мере использовать ограничения дублирования переделок. С 1990-х годов 3D-моделирование используется для координации, планирования, создания и эксплуатации будущего сооружения. BIM-подход предлагает заинтересованным сторонам участвовать в общей интеллектуальной 3D-модели, облегчая координацию, решая интерфейсы, уменьшая усилия по дублированию и сохраняя информацию о разработанных данных на протяжении всего жизненного цикла конструкции и по завершении этапа строительства. Для выполнения сложной структуры взаимодействия необходимы высокий уровень управления проектированием и координация интерфейса между архитектором, конструктором, механиком, электриком и другими проектировщиками. От поставщиков оборудования требуются основные входные данные. В связи с этим каждый ответственный за процесс нацелен на достижение собственного результата с меньшими затратами и временем исполнения. Тем самым он непреднамеренно сокращает усилия, связанные с сопутствующими действиями, и сосредотачивается на своем основном результате. Например, структурная инженерия, разрабатывающая

Адрес для переписки

Леонович Сергей Николаевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Ф. Скорины, 25, корп. 1,
220076, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 368-61-56
leonovichsn@tut.by

Address for correspondence

Leonovich Sergey N.
Belarusian National Technical University
25, k. 1, F. Skoriny str.,
220076, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 368-61-56
leonovichsn@tut.by

3D-модель, будет нацелена на чистый структурный дизайн, ориентируясь на непрерывность конструкции, идентификацию геометрии и модель расчета для конечных элементов программного обеспечения. Точно так же будут моделироваться водопроводные и другие сети для изготовления и монтажа.

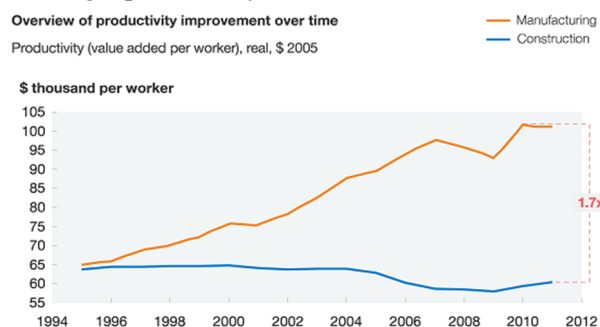
Ключевые слова: 3D-моделирование, жизненный цикл, информационная модель здания (BIM)

Для цитирования: Леонович, С. Н. 3D-моделирование для жизненного цикла сооружения / С. Н. Леонович, Ж. Риаши // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 1. С. 5–9. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-5-9>

Foreword

3D-models and associated data can provide rapid material take-off and cost estimates. Changes in estimated quantities can be effectively tracked and corrected in a timely manner with each design change. The cost of purchased equipment and paid subcontractors can also be specified in the model. Availability, quality control, and work acceptance can be linked to the model and automatically return a progress report. Visually, on-site 3D-model with attributive information (such as cost code and work breakdown WBS codes) will help you properly report costs and minimize errors in cost management and scheduled reporting. The 3D-model will help in estimating and managing costs, known as 5D BIM.

While currently the center of a construction project is oriented to a document control center, the building information model (BIM) proposes the use of a central shared 3D-model with attributed information as an efficient replacement. Construction productivity has been flat for decades, according to McKinsey research (Fig. 1) [1]. The concept-and-design phase is where the most project value can be gained or lost. A better project management and technological innovation is required to improve the productivity. This article is to highlight the concept and the utility of BIM [2, 3]. It is designated to project managers, owners, educational, design or construction professionals to improve making a preliminary decision.



Source: Expert interviews; IHS Global Insight (Belgium, France, Germany, Italy, Spain, United Kingdom, United States); World Input-Output Database

Fig. 1. Productivity in manufacturing versus productivity in construction per McKinsey and Company

Case study

The execution of a complex structure requires an important level of design management and in-

terface coordination between the architect, structural, mechanical, electrical and other designers. Key input data is required from equipment vendors. Now for a good reason each process responsible targets achieving his process at lower cost and shorter time. By doing so, he unintentionally, reduces efforts in surrounding or succeeding activities and focus on his main deliverable. The structural engineering, for example, developing a 3D-model will target a pure structural design focusing on structural continuity, geometry identification and calculation model for finite element software. Similarly, the mechanical engineer will model plumbing and mechanical networks for fabrication and installation purposes. Same with other design disciplines.

Or many of these efforts, if maintained or amended slightly forward, can be a major preparation to an efficient engineering interface resolution management. Looking further, these same 3D-models, if handed over adequately to construction and operations, will provide a great input to use.

For instance, construction can use the 3D-model to plan construction sequences, concrete lifts, dimensioning of formwork, detailing of reinforcement steel or steel structure installation sequence. Visualization of the construction sequence and timing window of each subcontractor can help identify any error or omission in the sequencing. Visually allocated space can be analyzed to fit construction equipment and identify accesses. The land surveying team will reduce his efforts in geometry calculation and use the model for the layout erection and verification. Surveying equipment has developed their interface software and machinery to accommodate BIM. The 3D-model will be linked to a construction schedule known as 4D BIM.

The 3D-models and associated data can produce quick material take-off and cost estimates. Changes to estimated quantities can be efficiently monitored and timely adjusted with each design change. Cost of procured equipment and paid subcontractors can also be posted in the model. Readiness, quality control and work acceptance can be linked to the model and return the work progress report automated. A visual availability on site of the 3D-model with attributed information (like cost code and Work Breakdown Structure (WBS) codes) will assist in correctly reporting costs and minimize errors to cost control and time sheet

reporting. The 3D-model will assist in estimates and cost management known as the 5D BIM.

After the construction is achieved, the final as built models can efficiently be used in the facility management and maintenance. The building space usage and management can be efficiently planned on the virtual model. It assists in analyzing the energy building performance and conduct required optimization. The maintenance team equipped with virtual reality tools can maximize the efficiency of maintenance works. Service quality of freeways and even city roads with cameras linked to GPS can report repair and maintenance needs. The 3D-model and attributed data will assist in the facility's operation, sustainability and maintenance. This is known as the 6D BIM (Fig. 2) [4].

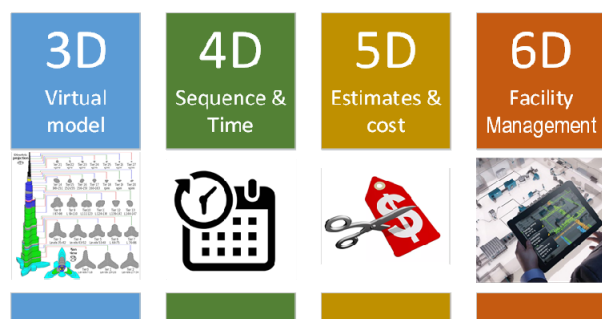


Fig. 2. The six dimensions of BIM

So, what is BIM

The building information model, called BIM, is a model-based organization of structures' production and management processes. It is a centralized integrated model and data environment for stakeholder's collaboration. Developing 3D-design in a single software is just the level-1 of BIM. BIM is a hub of execution collaboration, interfaces and continuity. The 3D-model and its attribute data

become the core of the information and exchanges (Fig 3). BIM is not a new software, it is a logic optimization of the efforts and extending the use of existing software by using the 3D-model and information data as a shared core [5]. More and more BIM applications are opening the possibilities for more collaboration, accessibility and functionality in all aspects of management [6, 7].

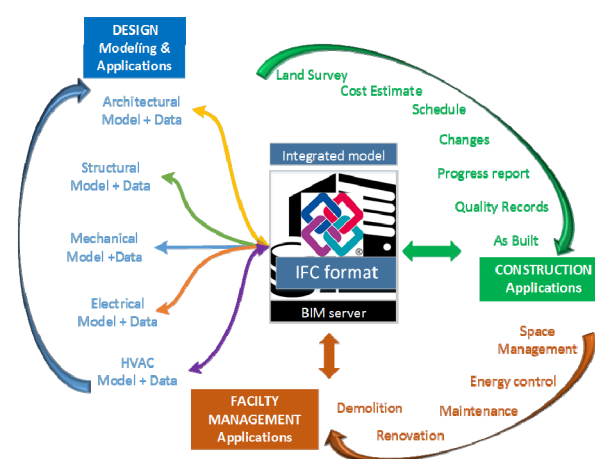


Fig. 3. BIM models + Data & BIM applications in lifecycle use

It is not new that, to reduce cost and time, organizations aim to develop management processes compatible and intercommunicating. Imagine now BIM creating this open space for development providing real visualization and applications with a wide range of services.

The sequence of design execution is planned based on the interface coordination and the input sequencing needs (Fig 4). Order of priority and early required information are scheduled to provide timely input to further development. Complete sequencing is planned to achieve the full scope of activities.

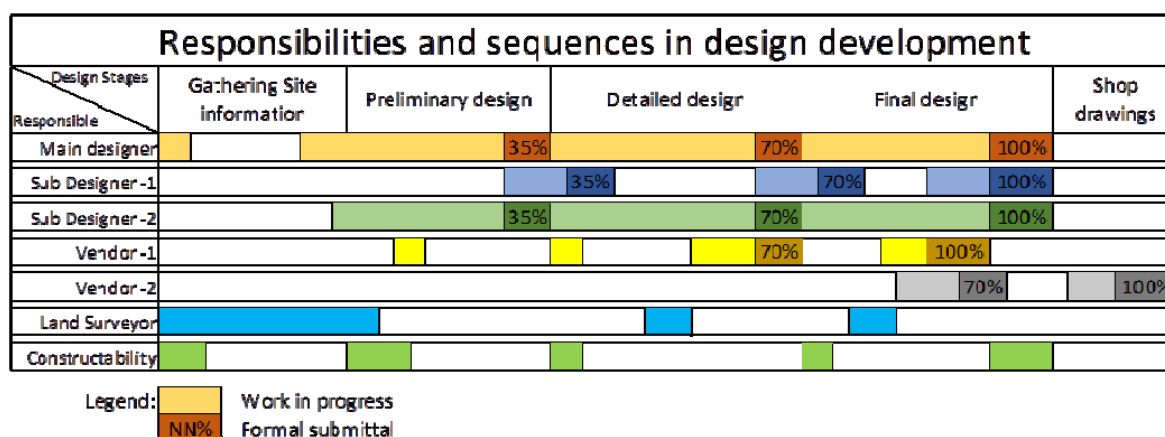


Fig. 4. Basic presentation of design planning

When BIM is advantageous

We provided above a brief description of BIM beneficial use. Owners and contractors need to run a cost-benefit analysis to assess the advantage of using BIM on their projects.

The complexity of the project including interfaces between different designers, prefabrication, crowded layout, complex existing conditions, overlay sequencing of work execution, use of automated execution processes, intelligent and geographically oriented construction tools and equipment, dynamic space changing, efficient facility management, highly responsive maintenance service, will definitely justify the implementation of BIM-technology.

The BIM literature describes the BIM-process as a front-loaded schedule of work. This means that significant cost is to be spent at the earlier stage of the work and namely the earlier design stage. Personally, we disagree with this statement. The work load distribution depends on how the owner or the designer organize their work execution. For instance, when the design is at a preliminary stage, input to BIM can be limited to a basic level of development like LOD-100 (Fig. 5).

Gathered site data and basic presentation of preliminary geometry (called 35 % design) can be enough at the preliminary stage. Even at a final stage of the design (100 %), the BIM model can be limited to a low (LOD-200) or medium (LOD-300) level of development [8]. This judgment shall be based on the specific needs to have a higher level of development for succeeding activities. It is common to limit the details of civil works to a LOD-300.

By organizing the LOD for each design development stage, efforts can be spread to minimize

spending upfront when technical decisions are not yet finalized. This does not differ from the classic design execution approaches. With BIM, probably a slight increase in cost will be due to the learning curve in implementing the new technology. This cost increase shall be compensated by eliminating the waste of produced efforts at the design stage and making a further use of it during construction and facility management. The correct implementation of BIM will reduce cost in rework and planning errors.

The value of BIM for owners is to save time and money on design and construction and make return benefice during the building lifecycle. General design-build contractors can also make benefice in implementing BIM through the design and construction phases.

BIM's challenges and opportunities

In many countries governments and authority agencies are lacking behind and haven't yet developed the legal environment for BIM implementation. The form of approval involving professional registered engineers is not yet formalized. Receiving work permitting from authorized agencies is not yet accepted in the form of a 3D-model (Fig. 6) [8, 9].

The majority of design engineers and technicians are not yet comfortable submitting a formal design in BIM formats with electronic signatures. Decisions are to be made regarding the format of the technical specifications. Most of the experimented construction personnel have not been trained to read and use BIM models. Many companies will need additional investments in training and equipment to implement BIM technologies.

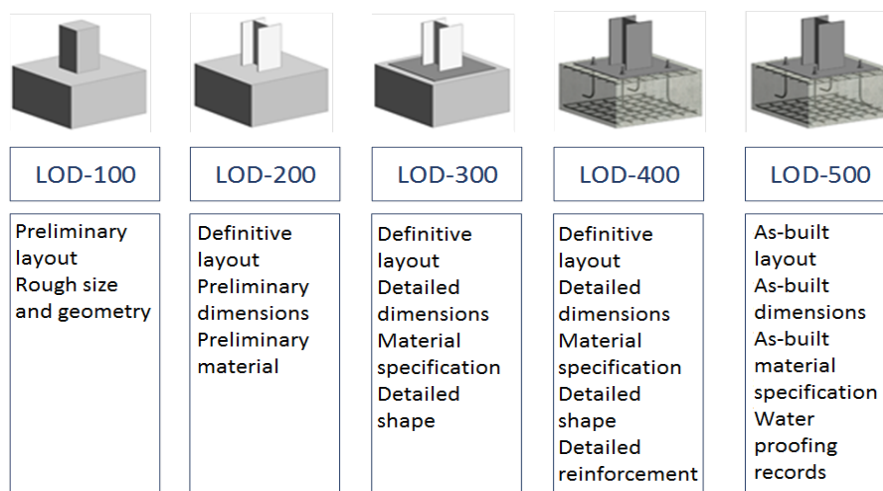


Fig. 5. Levels of development in BIM: LODs = LOD + LOI; Level of development = Level of details + Level of information

While the 3D-model is the core, applications have missed providing other alternative ways of accessing specific information. The table of contents or the structured trees for an alternative searching method like most of users are familiar with Microsoft Explorer.

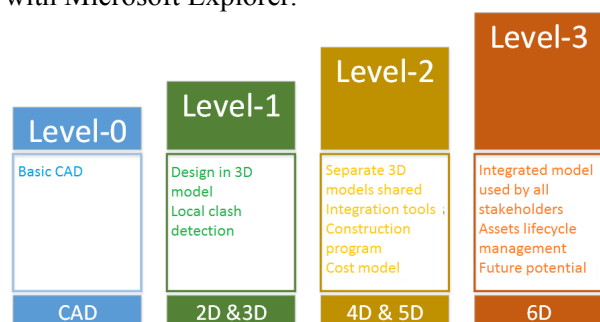


Fig. 6. Levels of maturity of BIM

Applications for access control and change authority is becoming an actual challenge. Open BIM versus closed BIM and information security and control, servers' locations and backup of information still to be elaborated to accommodate security needs.

Vanguard countries are developing digital standards to achieving compatibility, so companies can work with any software that fits their needs and stay compatible with each other.

Development and research companies are competing on completing missing BIM application to support the project lifetime processes. The open nature of BIM applications opens the opportunity for small developers [3, 10].

CONCLUSION

BIM technology is relatively recent and is still progressing. Software developers are creating new applications and advancing existing ones. Construction equipment is increasing automation and georeferenced reading which increase their productivity. Land surveying equipment increases its capability of scanning of existing conditions and reporting relatively clear 3D-shapes. Design 3D-models are downloaded in land survey machi-

nery and easily used for the site erection. Execution schedule can be viewed in video format for better analysis and decision-making. Tablets with virtual reality are used for construction and maintenance activities. New application help identifying design clashes, quantity take off and costs. The work acceptance and quality control are documented with links and references to the virtual 3D-model. The technological progress is continuing its maturation and fine-tuning of these processes are progressing daily. Governments and organizations making use of this technology will be advantaged compared to others.

REFERENCES

1. The Construction Productivity Imperative. *McKinsey&Company*. Available at: <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/the-construction-productivity-imperative>. (Accessed 14 January 2019).
2. Le BIM: Signification, Definition et Explications. *Objectif BIM*. Available at: <https://objectif-bim.com/index.php/bim-maquette-numerique/le-bim-en-bref/la-definition-du-bim>. (Accessed 16 January 2019).
3. *Bentley Search*. Available at: <https://www.bentley.com/>. (Accessed 15 January 2019).
4. *List of BIM Software & Providers*. Available at: <http://www.cad-addict.com/2010/03/list-of-bim-software-providers.html>. (Accessed 13 January 2019).
5. What is BIM? *Autodesk*. Available at: <https://www.autodesk.ru/solutions/bim>. (Accessed 15 January 2019). (in Russian).
6. *BimObject*. Available at: <https://www.bimobject.com/>. (Accessed 15 January 2019).
7. Civil Infrastructure Strategic Foresight. *Autodesk*. Available at: <https://www.autodesk.com/solutions/bim/hub/infrastructure-digital-foresight>. (Accessed 15 January 2019).
8. BIM Dimensions – 3D, 4D, 5D, 6D BIM Explained. *NBS*. Available at: <https://www.thenbs.com/knowledge/bim-dimensions-3d-4d-5d-6d-bim-explained>. (Accessed 11 January 2019).
9. BIM Levels Explained. *NBS*. Available at: <https://www.thenbs.com/knowledge/bim-levels-explained>. (Accessed 11 January 2019).
10. BIM: How we Build Builders at the Construction Site – Data Mining. Available at: https://umumble.com/blogs/data_mining/bim%3A-how-we-build-builders-at-the-construction-site/. (Accessed 11 January 2019).

Received: 31.01.2019

Accepted: 17.09.2020

Published online: 29.01.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-10-15>

УДК 69.058.8; 624.21

Диагностика участков мостового полотна и подходов в зонах устройства деформационных швов на автодорожных мостах

Асп. В. А. Ходяков¹⁾, инженеры А. В. Кулан¹⁾, Е. Н. Савина¹⁾,
кандидаты техн. наук, доценты И. Л. Бойко¹⁾, В. А. Гречухин¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Объект исследования – долговечность деформационных швов мостовых сооружений, предмет исследования – виброотклик сооружения, полученный в условиях естественной эксплуатации. Диагностика деформационных швов автодорожных мостов проводилась с целью выявления характерных зависимостей между величиной виброотклика сооружения и типами конструкций деформационных швов в течение периода их эксплуатации с учетом особенностей мостового сооружения. Для этого апробировали методику сбора и обработки данных о виброотклике сооружения в естественных условиях его эксплуатации. В статье представлены результаты сбора данных о топологии покрытия, собранные методом трехмерного сканирования. Сбор информации о виброотклике сооружения осуществляли при помощи измерения виброскорости и деформаций сооружения. В результате испытания и анализа полученных данных выявлены основные исследуемые характеристики: величина неровности основания, амплитуда виброскорости и виброперемещение элементов сооружения. Назначены два основных параметра динамического воздействия с поправкой на массу движущегося транспортного средства, которые могут быть использованы в качестве основных для оценки величины динамического воздействия. Разработана и предложена комплексная методика оценки динамического воздействия на мостовые сооружения. Ее использование позволит дифференцировать различные конструкции деформационных швов по величине динамического воздействия транспортных средств. Это в свою очередь поможет сформулировать новые рекомендации о применении конкретных типов конструкций деформационных швов для различных категорий автомобильных дорог, что повысит долговечность эксплуатации деформационных швов и сооружения в целом.

Ключевые слова: относительная деформация, прогиб, виброскорость, виброперемещение, изополе, долговечность, нагрузка, виброотклик, неровность, 3D-сканирование, удар, жесткость, виброметрия, тензометрия, динамическое воздействие

Для цитирования: Диагностика участков мостового полотна и подходов в зонах устройства деформационных швов на автодорожных мостах / В. А. Ходяков [и др.] // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 1. С. 10–15. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-10-15>

Diagnostics of Bridge Bed Sections and Approaches in Zones of Expansion Joints on Road Bridges

V. A. Hodyakov¹⁾, A. V. Kulan¹⁾, E. N. Savina¹⁾, I. L. Boiko¹⁾, V. A. Grechuhin¹⁾

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

Abstract. The object of the study is durability of expansion joints in bridge structures; the subject of the research is the vibration response of a structure obtained under conditions of natural operation. Diagnostics of the road bridge expansion joints has been carried out in order to identify characteristic dependences between the value of structure vibration response and types

Адрес для переписки

Ходяков Вячеслав Андреевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 146а,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 369-94-77
mit_bntu@tut.by

Address for correspondence

Hodyakov Vyacheslav A.
Belarusian National Technical University
146a, Nezavisimosty Ave.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 369-94-77
mit_bntu@tut.by

of expansion joint designs during the period of their operation while taking into account the features of the bridge structure. For this purpose, we have tested the methodology for collecting and processing data on the vibration response of the structure under natural conditions of its operation. The paper presents results of data collection on the coverage topology which have been obtained while using three-dimensional scanning method. Data collection on the vibration response of the structure has been carried out by measuring the vibration velocity and deformation of the structure. The data obtained are analyzed. As a result of testing and analysis of the obtained data, the main characteristics have been revealed: the value of base unevenness, the amplitude of vibration velocity and vibration displacement of the structure elements. Two main parameters of the dynamic impact have been assigned, adjusted for the mass of a moving vehicle, which can be used as main parameter for assessing the magnitude of the dynamic impact. A comprehensive method for assessing the dynamic impact on bridge structures has been developed and proposed in the paper, and its use will make it possible to differentiate various designs of expansion joints according to the magnitude of the dynamic impact of vehicles. This, in its turn, will contribute to formulate new recommendations on the use of specific types of expansion joints for various categories of highway, which will increase operational durability of expansion joints and the structure as a whole.

Keywords: relative deformation, sag, vibration velocity, vibration displacement, iso-area, durability, load, vibration response, unevenness, 3D-scanning, impact, stiffness, vibrometry, tensometry, dynamic impact

For citation: Hodyakov V. A., Kulan A. V., Savina E. N., Boiko I. L., Grechuhin V. A. (2021) Diagnostics of Bridge Bed Sections and Approaches in Zones of Expansion Joints on Road Bridges. *Science and Technique*. 20 (1), 10–15. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-10-15> (in Russian)

Введение

Деформационные швы мостовых сооружений являются одними из наиболее ответственных с точки зрения долговечности элементов. Главная проблема долговечной эксплуатации деформационных швов – различная жесткость материалов дорожных одежд и самих деформационных швов [1]. Вследствие резкого изменения жесткости основания, по которому движется колесо автомобиля, происходит удар, оказывающий разрушительное воздействие на элементы сооружения.

Один из путей решения данной проблемы – использование наиболее прочных и долговечных материалов в конструкции деформационных швов типа КРМ [2]. Применение таких швов решает проблему сопротивления динамическому воздействию путем упрочнения деталей деформационного шва. Парадоксально то, что использование более прочных и жестких материалов увеличивает разницу жесткостей, которая и является одной из причин динамического воздействия на конструкции мостового сооружения. Поэтому к решению данной проблемы можно подойти с другой стороны – путем поиска вариантов уменьшения этого динамического воздействия.

Для дальнейших исследований в рассматриваемой области необходимо создать и апробировать методику сбора и обработки данных испытаний. Цель их – дифференциация основных видов конструкций и конструктивных особенностей деформационных швов, применяемых

на территории Республики Беларусь, в зависимости от величины вызываемого ими динамического воздействия.

Основная часть

Ударные воздействия на элементы пролетного строения мостового сооружения возникают вследствие наезда колеса автомобиля, движущегося на высокой скорости, на неровности, расположенные в зоне перехода дорожного полотна и подходов в мостовое полотно. Наиболее важный с этой точки зрения – участок в начале моста по ходу направления движения автотранспорта.

Зона устройства деформационного шва имеет определенные неровности, из которых можно выделить два типа. К первому относятся неровности, обусловленные конструкцией самого деформационного шва, ко второму – неровности, возникающие по границе сопряжения конструкции деформационного шва с асфальтобетонным покрытием. Последние появляются в процессе эксплуатации сооружения.

Провели диагностику зоны устройства деформационного шва типа КРМ [3] с бетонными подливками по 25–30 см с обеих сторон. Ширина основных полос движения 3,2 м, предельно допустимая скорость движения по путепроводу 90 км/ч, опорные части пролетного строения – полиуретановые.

Исследовали зону в пределах 2–3 м от деформационного шва с 16:00 до 17:00 ч в рабочий день.

Сканирование

Сбор данных о топологии основания, по которому происходит качение колеса автомобиля, движущегося по полосе, проводили методом лазерного 3D-сканирования [4]. В результате сканирования участка полотна в зоне устройства деформационного шва получено облако точек (рис. 1).

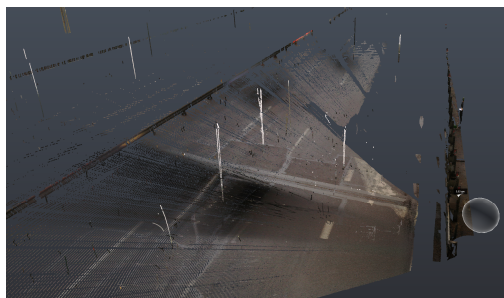


Рис. 1. Общий вид трехмерного облака точек в результате 3D-сканирования зоны устройства деформационного шва

Fig. 1. General view of three-dimensional point cloud as a result of 3D-scanning result of expansion joint zone

Благодаря тому, что сканирование занимает определенное время, при анализе облака точек можно определить ту полосу, по которой наблюдается наиболее высокая интенсивность движения большегрузного транспорта. На рис. 1 видны вертикальные светлые полосы бортов полуприцепов, подвергшихся сканированию в момент их проезда по исследуемому участку. Анализ облака точек показал, что за время сканирования по первой полосе движения проследовало два тяжелых грузовых автомобиля, по второй – около семи. При этом по третьей, наиболее скоростной полосе движения грузовиков не выявлено. В дальнейшем третья полоса движения не рассматривалась.

Из облака были выделены цепочки точек, по которым построены характерные поперечные профили (рис. 2). Расстояние между осями спаренных колес в поперечном направлении принято равным 1800 мм, а ширина спаренного колеса 800 мм. Значения приняты на базе транспортной нагрузки LM1 [5], а также исходя из геометрических размеров тележек грузовых автомобилей МАЗ [6].

На поперечных профилях наблюдается наличие колеи. В частности, по оси деформационного шва: по первой полосе движения колея присутствует, по второй явно выраженной колеи не наблюдается.

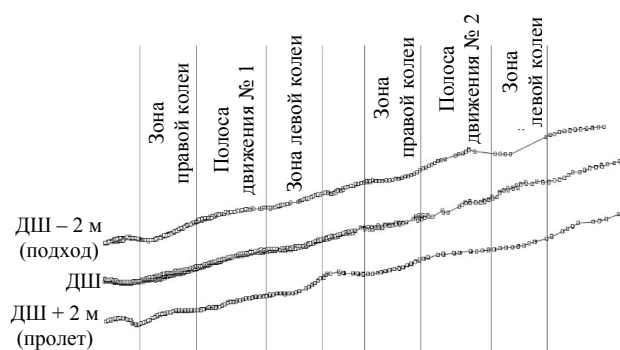


Рис. 2. Поперечные профили исследуемых характерных поперечных сечений (вертикальный масштаб относительно горизонтального увеличен в 10 раз)

Fig. 2. Transverse cross section profiles of the investigated characteristic cross-sections (vertical scale relative to the horizontal is increased by 10 times)

Если оценивать величину колеиности с применением рейки с клиновым промерником в соответствии с ГОСТ 30412–96 [7], то значения будут следующими:

- от 7 до 15 мм – на подходе к путепроводу;
- от 10 до 11 мм – на путепроводе.

Наибольший интерес представляет анализ сечений по продольным осям каждой колеи (рис. 3). На полученных профилях явно выделяются неровности как первого, так и второго типов, связанные с устройством деформационного шва типа КРМ. Срок эксплуатации данного деформационного шва на момент проведения сканирования составлял около полугода.

После проведения подробного анализа топологии были получены величины характерных превышений, которые составили:

- от 5 до 11 мм – дорожное полотно, левая бетонная подливка;
- от 0 до 4 мм – левая бетонная подливка, левый край резиновой части шва;
- от 0 до 5 мм – правый край резиновой части шва, правая бетонная подливка;
- от 5 до 11 мм – правая бетонная подливка, мостовое полотно.

Если оценивать максимальную величину неровностей, соответствующую той, которая может быть получена с применением рейки с клиновым промерником в соответствии с [7], то значения будут следующими:

- от 9 до 12 мм – перед деформационным швом;
- от 10 до 13 мм – за деформационным швом.

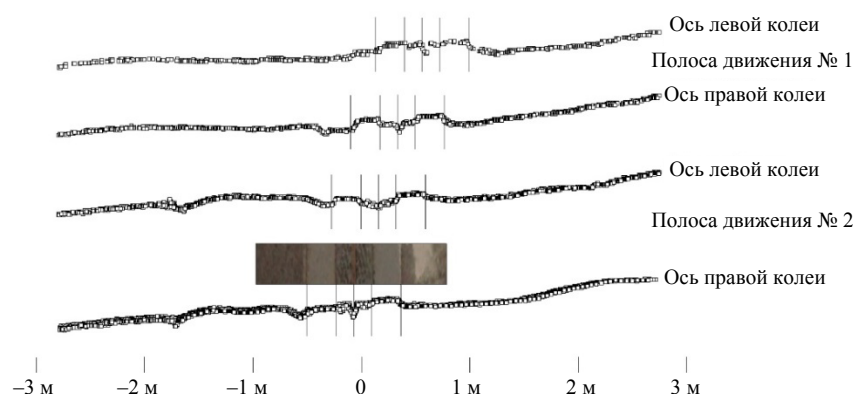


Рис. 3. Продольные профили исследуемых характерных сечений
(вертикальный масштаб относительно горизонтального увеличен в 10 раз)

Fig. 3. Longitudinal cross section profiles of the investigated characteristic cross-sections sections
(vertical scale relative to the horizontal is increased by 10 times)

Исследуя характер неровностей, можно сделать вывод, что выбоина перед бетонной подливкой имеет небольшую протяженность (до 40 мм) по причине локальных ударных воздействий колеса о кромку бетонной подливки. В свою очередь, за деформационным швом асфальтобетонное покрытие системно ниже бетонной подливки. Последнее связано с повышенными нагрузками на покрытие, возникающими в процессе затухания колебаний подпрессоренных масс транспортного средства.

Провели углубленный анализ трехмерного облака точек с использованием специальных программных методов [8]. Построили плос-

кость нормального уровня асфальтобетонного покрытия. Деформация асфальтобетонного покрытия относительно нормального уровня показана на рис. 4. Зеленое поле на 50 мм выше красного. Представление результатов сканирования в виде такого рода изополя позволяет комплексно оценить топоологию покрытия в районе исследуемого участка.

Анализ представленного изополя показывает прямую зависимость между наблюдаемой интенсивностью движения тяжеловесного транспорта по полосам и величиной деформации асфальтобетонного покрытия.

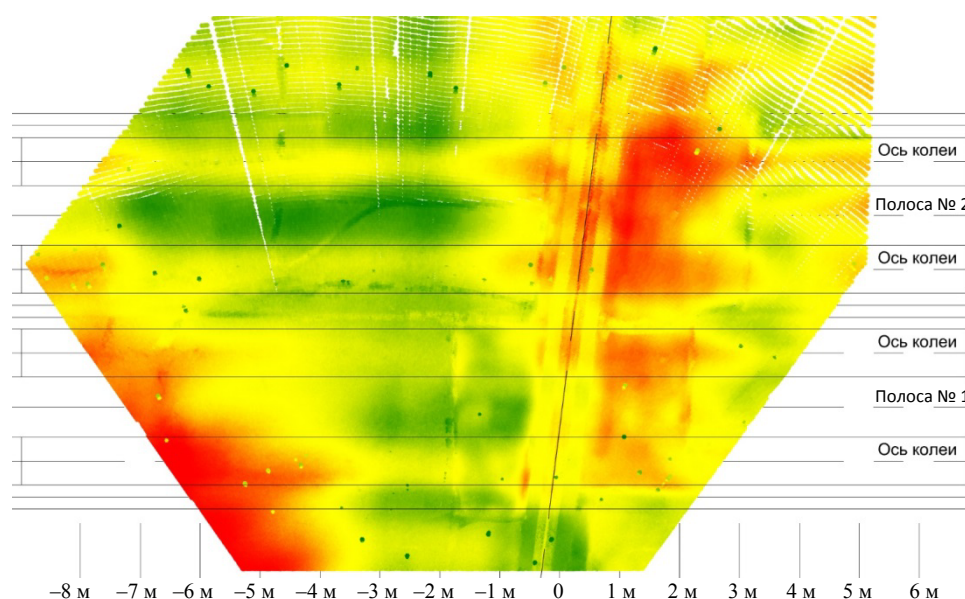


Рис. 4. Изополе деформации асфальтобетонного покрытия

Fig. 4. Isofield of deformation in asphalt concrete pavement

Вибродиагностика

Анализ ударных воздействий на конструкцию пролетного строения путепровода производили на основании результатов измерения виброускорений ребристого пролетного строения моста. Для измерения использовался четырехканальный виброанализатор. Датчики устанавливались на элементы пролетного строения в приопорной зоне. Совместно с применяемыми акселерометрами устанавливались электрические тензометры с высокой частотой получения данных.

При наезде тяжелых транспортных средств на неровности деформационного шва фиксировались всплески измеряемых величин. На рис. 5, 6 представлены диаграммы, полученные в момент проезда по путепроводу четырехосного автомобиля МАЗ, груженого грунтом.

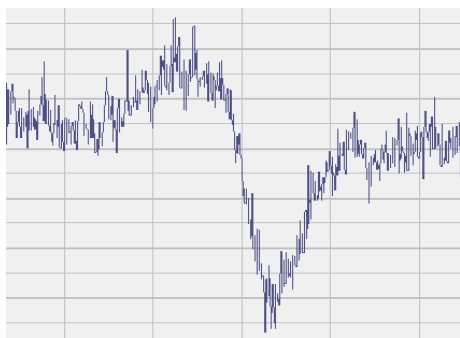


Рис. 5. Диаграмма тензометрического отклика – относительные деформации

Fig. 5. Diagram of strain response – relative strains

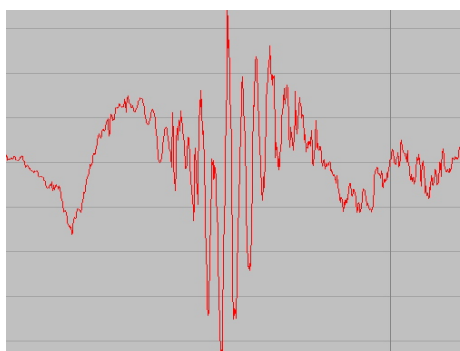


Рис. 6. Диаграмма виброметрического отклика – виброскорость

Fig. 6. Diagram of vibrometric response – vibration velocity

Отдельной серией измерений проводилась фиксация динамического прогиба пролетного строения путепровода при помощи сейсмогра-

фа. Сейсмограф устанавливался в центре пролета за деформационным швом путепровода на тротуаре. При прохождении тяжелых транспортных средств также фиксировались характерные всплески (рис. 7).

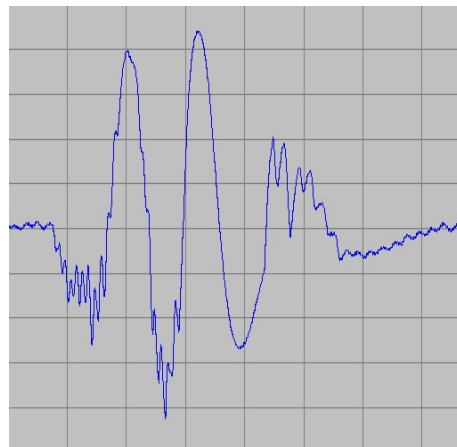


Рис. 7. Диаграмма виброметрического отклика – центр пролетного строения, виброперемещение

Fig. 7. Diagram of vibrometric response – center of span, vibration displacement

ВЫВОДЫ

1. Величина ударного воздействия прямо пропорциональна массе транспортного средства. Контроль значения последнего может быть осуществлен при помощи динамического прогиба или относительных деформаций материала конструкции. Поэтому для корректной оценки ударного воздействия с поправкой на массу автотранспортного средства в качестве двух основных нормируемых величин следует принимать:

- отношение амплитуды виброскорости, измеренной в зоне деформационного шва, к амплитуде измеренных относительных деформаций;

- отношение амплитуды виброскорости, измеренной в зоне деформационного шва, к амплитуде виброперемещения, измеренного в центре пролетного строения.

Обе величины должны быть получены при совместном их измерении для одного события ударного воздействия.

2. При длительном периоде измерения указанные выше контролируемые величины могут быть подвергнуты статистическому анализу [9, 10], в результате которого будет получено

основное значение, характеризующее величину ударного воздействия транспортных средств на конструкцию деформационного шва. Для обследуемого сооружения основные величины ударного воздействия в среднем составили 2,42 (мм/с)/ЕОД и 7,88 (мм/с)/мм. Полученные значения соответствуют деформационному шву типа КРМ после полугода эксплуатации на путепроводе со скоростным режимом 90 км/ч. Неровности в зоне устройства деформационного шва были в пределах 9–13 мм.

3. Зависимости между величинами динамических воздействий и типами деформационных швов могут быть получены при выполнении подобных испытаний для нескольких сооружений с характерными неровностями деформационных швов и сопоставлении основных величин ударного воздействия с величинами неровностей и другими параметрами испытываемых сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Овчинников, И. И. Повреждения зон сопряжения дорожных одежд и деформационных швов на мостовых сооружениях: возможные причины и способы их устранения / И. И. Овчинников, И. Г. Овчинников, Ш. Н. Валиев // Наукоедение. 2013. № 6. С. 148.
2. Кротов, Р. Г. Повышение долговечности деформационных швов на пролетных строениях мостов в условиях интенсивного движения транспорта / Р. Г. Кротов. Минск: Белор. нац. техн. ун-т, 2019. 24 с.
3. Рубцова, Т. А. Конструкция деформационного шва с резинометаллическим компенсатором КРМ-120, обеспечивающим перемещения до 120 мм / Т. А. Рубцова, В. А. Зверинский, Р. Г. Кротов // Автомобильные дороги и мосты. 2013. № 1. С. 54–58.
4. Ботьяновский, А. А. Геодезические работы в составе мониторинга сооружений при строительстве транспортной развязки над тоннелями метрополитена в г. Минске / А. А. Ботьяновский // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Пермь: Пермский нац. исслед. политех. ун-т, 2016. С. 253–255.
5. Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Часть 2. Транспортные нагрузки на мосты: ТКП EN 1991-2-2009 (02250). Введ. 01.01.2010. Минск: Минстройархитектуры, 2010. 158 с.
6. Минский автомобильный завод: каталоги для загрузки [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://maz.by/ru/products/catalogs/>. Дата доступа: 14.04.2020.
7. Дороги автомобильные и аэродромы. Методы измерений неровностей оснований и покрытий: ГОСТ 30412-96. Введ. 01.01.1997. М.: Межгосуд. науч.-техн. комис. по стандарт. и технич. нормир. в стр.-тве, 1996. 10 с.

8. Ходяков, В. А. Генеративное проектирование / В. А. Ходяков // Инновационные решения проблем экономики знаний Беларуси и Казахстана: сб. матер. науч.-практ. конф., 13 окт. 2016 г., г. Минск. Минск: Белор. нац. техн. ун-т, 2016. С. 53–54.
9. Золотухин, Ю. Д. Испытание строительных конструкций / Ю. Д. Золотухин. Минск: Вышэйш. шк., 1983. 208 с.
10. Долидзе, Д. Е. Испытание конструкций и сооружений / Д. Е. Долидзе. М.: Высш. шк., 1975. 252 с.

Поступила 02.07.2020

Подписана в печать 29.10.2020

Опубликована онлайн 29.01.2021

REFERENCES

1. Ovchinnikov I. I., Ovchinnikov I. G., Valiev Sh. N. (2013) Damage to Pavement Mating zones and Expansion Joints on Bridge Structures: Possible Causes and Methods for their Elimination. *Naukovedenie* [Science Studies], (6), 148 (in Russian).
2. Krotov R. G. (2019) *Increasing the Durability of Expansion Joints on Bridge Spans in Condition of Heavy Traffic*. Minsk, Belarusian National Technical University. 24 (in Russian).
3. Rubtsova T. A., Zverinsky V. A., Krotov R. G. (2013) Expansion Joint Design with Rubber-Metal Compensator KPM-120 (KRM-120), Providing Movement up to 120 mm. *Avtomobilnye Dorogi i Mosty* [Highways and Bridges], (1), 54–58 (in Russian).
4. Botyanovskii A. A. (2016) Geodetic Works as Part of the Monitoring of Structures During Construction of a Traffic Intersection Above the Subway Tunnel in Minsk. *Modernizatsiya i Nauchnye Issledovaniya v Transportnom Komplekse: Materialy Mezhdunarodnoi Nauchno-Prakticheskoi Konferentsii* [Modernization and Scientific Research in the Transport Complex: Materials of the International Scientific and Practical Conference]. Perm, Perm National Research Polytechnic University, 253–255 (in Russian).
5. TKP [Technical Code of Common Practice] EN 1991-2-2009 (02250). *Eurocode 1. Effects on Structures. Part 2. Transport Loads on Bridges*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2010. 158 (in Russian).
6. *Minsk Automobile Plant: Download Directories*. Available at: <http://maz.by/products/catalogs>. (Accessed 14 April 2020) (in Russian).
7. State Standard 30412-96. *Automobile Roads and Airfields. Methods for Measuring Unevenness of Substrates and Coatings*. Moscow, Interstate Scientific and Technical Commission for Standardization and Technical Regulation in Construction, 1996. 10 (in Russian).
8. Khodyakov V. A. (2016) Generative Design. *Innovatsionnye Resheniya Problem Ekonomiki Znaniy Belarusi i Kazakhstana: Sb. Mater. Nauch.-Prakt. Konf., 13 Okt. 2016 g., Minsk* [Innovative Solutions to the Problems of the Knowledge Economy of Belarus and Kazakhstan: Collection of Materials of Scientific and Practical Conference, October 13, 2016, Minsk]. Minsk, Belarusian National Technical University, 53–54 (in Russian).
9. Zolotukhin Yu. D. (1983) *Testing of Building Structures*. Minsk, Vysheyschaya Shkola Publ. 208 (in Russian).
10. Dolidze D. E. (1975) *Testing of Structures and Structures*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 252 (in Russian).

Received: 02.07.2020

Accepted: 29.10.2020

Published online: 29.01.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-16-25>

УДК 539.3

Моделирование и численное решение задачи с односторонними связями и трением при динамическом действии нагрузки

Докт. техн. наук, доц. А. А. Лукашевич¹⁾,
кандидаты техн. наук Н. К. Лукашевич¹⁾, Н. В. Островская¹⁾

¹⁾Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
(Санкт-Петербург, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Задачи с односторонними связями нередки в практике расчетов строительных конструкций и сооружений. Определенные трудности в их решении возникают при трении на контакте, а также при динамическом действии нагрузки. Известно, что такие задачи с математической точки зрения являются недостаточно корректными, решение их усложняется и зависит от истории нагружения и деформирования конструкции. В то же время возможность учета сложных условий работы конструкции делает ее расчет более полным и точным. В статье рассмотрено решение динамической контактной задачи на основе метода конечных элементов и метода шагового нагружения. Односторонние связи с кулоновским трением моделируются с помощью контактных конечных элементов рамно-стержневого типа. Для соблюдения ограничений в условиях по предельному трению-скольжению применяется способ компенсирующих нагрузок. На основе рассмотренной дискретной модели контакта и метода пошагового анализа разработан численный алгоритм, позволяющий в одном пошаговом процессе выполнять одновременно интегрирование уравнений движения и реализацию контактных условий с трением Кулона. С помощью предложенного подхода получены и проанализированы численные решения задачи контакта сооружения с основанием при различных параметрах динамической нагрузки. Сравнение результатов с решением, выполненным известным методом итераций по предельным силам трения, позволяет сделать вывод об эффективности и надежности разработанного алгоритма при сложных условиях контакта и динамическом нагружении.

Ключевые слова: конструкция, контактное взаимодействие, односторонние связи, трение Кулона, пошаговый анализ, динамическое нагружение, дискретная модель, метод конечных элементов

Для цитирования: Лукашевич, А. А. Моделирование и численное решение задачи с односторонними связями и трением при динамическом действии нагрузки / А. А. Лукашевич, Н. К. Лукашевич, Н. В. Островская // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 1. С. 16–25. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-16-25>

Modelling and Numerical Solution of the Problem with Unilateral Constraints and Friction under Dynamic Action of the Load

A. A. Lukashevich¹⁾, N. K. Lukashevich¹⁾, N. V. Ostrovskaya¹⁾

¹⁾Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering
(Saint Petersburg, Russian Federation)

Abstract. Problems with unilateral constraints are not uncommon in the practice of calculating building construction and structures. Certain difficulties in solving them arise during contact friction, as well as the dynamic action of the load. It is known that such problems from a mathematical point of view are not correct enough, their solution becomes more

Адрес для переписки

Лукашевич Анатолий Анатольевич
Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет
2-я Красноармейская ул., 4,
190005, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
Тел.: +7 911 821-25-53
aaluk@bk.ru

Address for correspondence

Lukashevich Anatoly A.
Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering
4, Vtoraya Krasnoarmeiskaya str.,
190005, Saint Petersburg, Russian Federation
Tel.: +7 911 821-25-53
aaluk@bk.ru

complicated and depends on the history of loading and deformation of the structure. At the same time, the ability to take into account the complex working conditions of the structure makes its calculation more complete and accurate. The paper considers the solution of a dynamic contact problem on the basis of the finite element method and the step-by-step loading method. Unilateral constraints with Coulomb friction are modeled using contact finite elements of a frame-rod type. The method of compensating loads is applied in order to comply with the limitations under ultimate friction-sliding conditions. Based on the considered discrete contact model and the step-by-step analysis method, a numerical algorithm has been developed, which allows in one step-by-step process to integrate simultaneously the equations of motion and implement contact conditions with Coulomb friction. With the help of the proposed approach, numerical solutions of the problem pertaining to a structure contact with the base have been obtained and analyzed at various parameters of dynamic load. Comparison of the results with the solution obtained by the well-known iteration method on the ultimate friction forces allows to conclude about the efficiency and reliability of the developed algorithm under complex contact conditions and dynamic loading.

Keywords: structure, contact interaction, unilateral constraints, Coulomb friction, step-by-step analysis, dynamic loading, discrete model, finite element method

For citation: Lukashevich A. A., Lukashevich N. K., Ostrovskaya N. V. (2021) Modelling and Numerical Solution of the Problem with Unilateral Constraints and Friction under Dynamic Action of the Load. *Science and Technique*. 20 (1), 16–25. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-16-25> (in Russian)

Введение

Конструктивно нелинейные задачи с односторонними связями нередко в практике расчетов различного рода конструкций и сооружений. При этом наибольшую трудность в решении представляют задачи с усложненными условиями контакта, в частности при учете контактного трения, динамического действия нагрузки. Такого рода задачи с математической точки зрения являются недостаточно корректными (в этом случае не удастся доказать существования и единственности решения), что значительно усложняет их численное решение. Статические контактные задачи с идеальными и неидеальными односторонними связями рассматривались в [1–10]. В то же время имеются расчеты конструкций, где нужно учитывать динамическое действие приложенных нагрузок [11–14].

При решении конструктивно нелинейных контактных задач применяются как итерационные (последовательных приближений), так и инкрементальные (пошаговые) методы. Так, в [11, 12] для численного решения динамической контактной задачи используется итерационный алгоритм корректировки скоростей типа Удзавы, в [15, 16] предлагается вариант итерационного алгоритма Шварца. В [17, 18] на основе вариационных формулировок контактных задач применяются различные варианты метода итераций по предельным силам трения. Как отмечается в этих и других работах, использование методов последовательных приближений позволяет строить экономичные итерационные алгоритмы, обладающие вычислительной устойчивостью и гарантирующие выполнение контактных условий для идеальных односторонних связей. Однако выполнение

условий трения-скольжения на контакте здесь имеет определенные трудности и не всегда может быть реализовано.

В [19] для выполнения условий контакта применяется слабая формулировка в виде эллиптического квазивариационного неравенства, решение вариационной задачи производится с помощью неявной схемы интегрирования по времени. Различные схемы численного решения уравнений движения также рассматриваются в [20, 21]. В первой из них на каждом временном шаге используются множители Лагранжа и принцип минимальной работы, во второй – на каждом шаге решается невыпуклая линейная задача дополненности. Достоинство шаговых методов в том, что решение задачи становится известно на любой стадии динамического нагружения. При этом имеется возможность точнее удовлетворить условиям трения-скольжения, поскольку решение задачи с учетом трения зависит от истории нагружения и деформирования конструкции [1–3]. При динамическом нагружении конструктивная нелинейность односторонних связей проявляется в изменении состояния односторонних связей по времени.

Данная статья посвящена построению расчетных моделей и методов решения задач с неидеальными односторонними связями при динамическом действии нагрузки. Для решения применяется дискретизация задачи по времени с использованием прямых схем интегрирования уравнений движения [22]. Расчетный шаг по времени назначается из анализа состояния контакта на заданном интервале времени Δt . Для ожидаемого момента изменения состояния контакта уточняется величина шага интегрирования и выполняется его перерасчет. Выполнение условий предельного трения-скольжения

производится с помощью корректировки контактных усилий по методу компенсирующих нагрузок. Таким образом, рассматриваемый подход имеет ясную физическую природу и предоставляет возможность отслеживать текущее состояние конструкции в любой момент времени.

Постановка задачи и методы решения

Рассмотрим динамическую задачу контактного взаимодействия упругодеформируемых тел V^+ и V^- , имеющих контактирующие поверхности S_c^+ и S_c^- соответственно. Для конечно-элементной модели данной системы справедливо матричное уравнение движения с начальными условиями [22]:

$$[M]\{\ddot{U}^{t+\Delta t}\} + [C]\{\dot{U}^{t+\Delta t}\} + [K]\{U^{t+\Delta t}\} = \{P^{t+\Delta t}\};$$

$$\{U\}_{t=0} = \{U_0\}; \quad \{\dot{U}\}_{t=0} = \{\dot{U}_0\}, \quad (1)$$

где $[M]$, $[C]$, $[K]$ – матрица масс, демпфирования и жесткости системы соответственно; $\{U^{t+\Delta t}\}$, $\{\dot{U}^{t+\Delta t}\}$, $\{\ddot{U}^{t+\Delta t}\}$, $\{P^{t+\Delta t}\}$ – вектор узловых перемещений, скоростей, ускорений и внешней узловой нагрузки в момент времени $t + \Delta t$.

Принимается модель пропорционального демпфирования (по Рэлею) $[C] = \alpha[M] + \beta[M]$.

На поверхности $S_g^\pm$ заданы граничные условия в усилиях, на $S_u^\pm$ – в перемещениях.

Представив $U^{t+\Delta t} = U^t + \Delta U^{t+\Delta t}$, сведем решение нелинейной динамической задачи к решению последовательности линейных задач на основе метода пошагового анализа изменения состояния контакта [23]:

$$[M]\{\ddot{U}^{t+\Delta t}\} + [C]\{\dot{U}^{t+\Delta t}\} + [K]\{\Delta U^{t+\Delta t}\} =$$

$$= \{P^{t+\Delta t}\} - [K]\{U^t\}; \quad (2)$$

$$\{U\}_{t=0} = \{U_0\}; \quad \{\dot{U}\}_{t=0} = \{\dot{U}_0\}.$$

Для решения уравнения (2) используется конечно-разностная схема Ньюмарка, предполагающая линейный закон изменения ускорений в интервале Δt . При интегрировании применяются следующие зависимости между перемещениями, скоростями и ускорениями в момент времени $t + \Delta t$ [22]:

$$\ddot{U}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\alpha(\Delta t)^2} (\Delta U^{t+\Delta t} - \Delta t \dot{U}^t) - \left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \ddot{U}^t; \quad (3)$$

$$\dot{U}^{t+\Delta t} = \dot{U}^t + ((1-\beta)\ddot{U}^t + \beta\ddot{U}^{t+\Delta t})\Delta t,$$

где $\alpha = 1/4$, $\beta = 1/2$ – параметры интегрирования, принятые из условия постоянного среднего ускорения в интервале Δt .

Выразив с помощью соотношений (3) ускорения $\ddot{U}^{t+\Delta t}$ и скорости $\dot{U}^{t+\Delta t}$ в (2) через перемещения $U^{t+\Delta t}$, получим матричное уравнение для определения $\Delta U^{t+\Delta t}$

$$[\hat{K}]\{\Delta U^{t+\Delta t}\} = \{\hat{P}^{t+\Delta t}\}, \quad (4)$$

где $[\hat{K}] = [K] + \alpha_0[M] + \alpha_1[C]$; $\{\hat{P}^{t+\Delta t}\} = \{P^{t+\Delta t}\} + [M](\alpha_2\{\dot{U}^t\} + \alpha_3\{\ddot{U}^t\}) + [C](\alpha_4\{\dot{U}^t\} + \alpha_5\{\ddot{U}^t\}) - [K]\{U^t\}$; $\alpha_0 - \alpha_5$ – коэффициенты, равные:

$$\alpha_0 = \frac{1}{\alpha(\Delta t)^2}; \quad \alpha_1 = \frac{\beta}{\alpha\Delta t}; \quad \alpha_2 = \frac{1}{\alpha\Delta t};$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{2\alpha} - 1; \quad \alpha_4 = \frac{\beta}{\alpha} - 1; \quad \alpha_5 = \frac{\beta\Delta t}{2\alpha} - \Delta t.$$

В произвольный момент времени t' , находящийся в интервале Δt ($t \leq t' \leq t + \Delta t$), значения перемещений $U(t')$, скоростей $\dot{U}(t')$ и ускорений $\ddot{U}(t')$ могут быть вычислены по формулам, полученным из (3) путем замены величины $t + \Delta t$ на t' :

$$\ddot{U}(t') = \ddot{U}^t + \frac{t' - t}{\Delta t} (\ddot{U}^{t+\Delta t} - \ddot{U}^t);$$

$$\dot{U}(t') = \dot{U}^t + \frac{t' - t}{2} (\ddot{U}^t + \ddot{U}^{t+\Delta t}); \quad (5)$$

$$U(t') = U^t + (t' - t)\dot{U}^t + \frac{(t' - t)^2}{4} (\ddot{U}^t + \ddot{U}^{t+\Delta t}).$$

Кроме того, при решении динамической задачи с односторонними связями и трением дополнительно к начальным и граничным условиям на $S_g^\pm$, $S_u^\pm$ должны выполняться контактные условия на $S_c^\pm$. Контактное взаимодействие будем моделировать с помощью рамностержневых контактных конечных элементов (ККЭ) [4, 9]. Данные ККЭ вводятся между контактирующими поверхностями взаимодействующих тел, тем самым дискретизируя пограничный слой между ними (рис. 1).

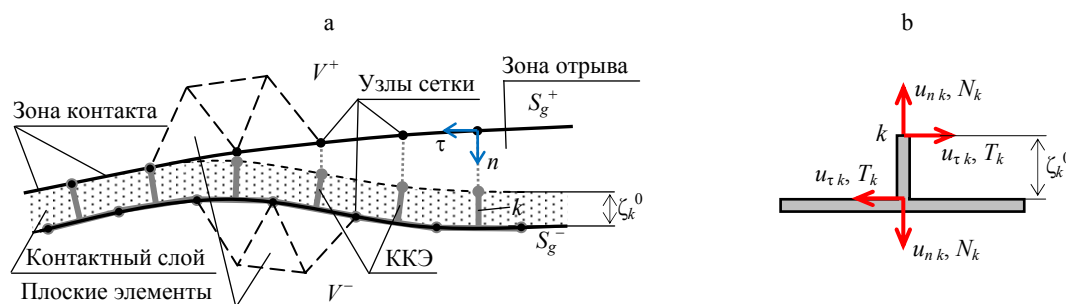


Рис. 1. Моделирование контактного взаимодействия с помощью контактных конечных элементов (ККЭ):
а – ККЭ в зоне контакта; б – перемещения и усилия в ККЭ

Fig. 1. Modeling of contact interaction using contact finite elements (CFE):
a – CFE in the contact zone; b – displacements and forces in the CFE

Запишем условия на контакте в терминах перемещений и усилий для каждой k -й дискретной односторонней связи (т. е. k -го ККЭ) для момента времени t :

$$u_{nk}^t \geq 0; N_k^t \leq 0; u_{nk}^t N_k^t = 0, k \in S_c; \quad (6)$$

$$|T_k^t| \leq |T_{Uk}^t|; T_k^t \dot{u}_{\tau k}^t \geq 0; (T_k^t - T_{Uk}^t) \dot{u}_{\tau k}^t = 0, k \in S_c, \quad (7)$$

где $u_{nk}^t, u_{\tau k}^t$ – взаимное смещение контактных поверхностей для k -й дискретной односторонней связи по нормали и по касательной; $\dot{u}_{\tau k}^t = \partial u_{\tau k}^t / \partial t$ – скорость взаимного касательного смещения; N_k^t, T_k^t – контактное усилие в направлении нормали и касательной (усилия в k -м ККЭ); $T_{Uk}^t = -f_k N_k^t$ – предельная «кулоновская» сила трения для k -го контакта; $f_k \geq 0$ – коэффициент трения-скольжения.

Таким образом, состояние контакта в односторонней связи определяется условиями $u_{nk}^t = 0, N_k^t < 0$, состояние отрыва – условиями $u_{nk}^t > 0, N_k^t = 0$. Условию $\dot{u}_{\tau k}^t = 0, |T_k^t| < |T_{Uk}^t|$ отвечает состояние сцепления (допредельного трения), а $\dot{u}_{\tau k}^t \neq 0, |T_k^t| = |T_{Uk}^t|$ – состояние проскальзывания, при этом направление проскальзывания совпадает с направлением поперечной силы. Событием будем называть момент изменения текущего состояния на противоположное: событие проскальзывания (из состояния сцепления), событие сцепления (наоборот), событие контакта (включение односторонней связи), событие отрыва (выключение связи).

Представим алгоритм пошагового анализа при решении динамической контактной задачи. Будем считать, что в момент времени t состояние односторонних связей известно – часть их ($k \in S_{lc}$) находится в состоянии контакта со сцеплением, другая часть ($k \in S_{2c}$) – в состоянии контакта с проскальзыванием, оставшиеся связи ($k \in S_{3c}$) – в состоянии отрыва, при этом $S_c = S_{lc} \cup S_{2c} \cup S_{3c}$.

1. Выполняется очередной шаг интегрирования Δt . После решения уравнения (4) находятся величины $\Delta u_{nk}^{t+\Delta t}, \Delta u_{\tau k}^{t+\Delta t}, u_{nk}^{t+\Delta t}, u_{\tau k}^{t+\Delta t}, \dot{u}_{\tau k}^{t+\Delta t}, N_k^{t+\Delta t}, T_k^{t+\Delta t}, T_{Uk}^{t+\Delta t}$ для каждой k -й односторонней связи в момент времени $t + \Delta t$.

2. Для каждой k -й связи определяется момент $\hat{t}_k$ наступления ближайшего по времени события на контакте:

– момент наступления события проскальзывания

$$\hat{t}_k = t + \Delta t \left(\frac{T_{Uk}^t - T_k^t}{(T_k^{t+\Delta t} - T_k^t) - (T_{Uk}^{t+\Delta t} - T_{Uk}^t)} \right), k \in S_{lc}; \quad (8)$$

– момент наступления события сцепления

$$\hat{t}_k = t + \Delta t \left(\frac{-\dot{u}_{\tau k}^t}{\dot{u}_{\tau k}^{t+\Delta t} - \dot{u}_{\tau k}^t} \right), k \in S_{2c}; \quad (9)$$

– моменты наступления соответственно событий отрыва или контакта:

$$\begin{aligned} \hat{t}_k &= t + \Delta t \left(\frac{-N_k^t}{N_k^{t+\Delta t} - N_k^t} \right), k \in S_{lc}, S_{2c}; \\ \hat{t}_k &= t + \Delta t \left(\frac{-u_{nk}^t}{u_{nk}^{t+\Delta t} - u_{nk}^t} \right), k \in S_{3c}. \end{aligned} \quad (10)$$

С помощью метода последовательных приближений может быть произведено итерационное уточнение величины $\hat{t}_k$, время расчета при этом возрастает незначительно [13, 23].

3. Устанавливается момент наступления ближайшего по времени очередного события: $\hat{t} = \min(\hat{t}_k), k \in S_c$. При $\hat{t} > t + \Delta t$ назначается базовый шаг Δt , и шаговый процесс продолжается с пункта 1. Если $t < \hat{t} < t + \Delta t$ – текущий шаг пересчитывается при $\Delta \hat{t} = \hat{t} - t$.

4. На каждом шаге интегрирования с целью выполнения условий по предельному трению-скольжению используется метод компенсирующих нагрузок [9, 23]. Корректировка сил трения на контакте производится путем приложения к соответствующим противолежащим узлам компенсирующих сил

$$\hat{F}_{\tau k} = -\Delta \hat{T}_{Uk} = -\frac{\Delta \hat{t}}{\Delta t} (T_{Uk}^{t+\Delta t} - T_{Uk}^t), k \in S_{2c}. \quad (11)$$

Одновременно корректируется величина поперечного усилия в k -м контактном элементе $T_k^{\hat{t}} = T_k^t + \Delta \hat{T}_{Uk}$.

5. В результате выполнения уточненного шага $\Delta \hat{t}$ определяются перемещения $u_{nk}^{\hat{t}}$, скорости $\dot{u}_{\tau k}^{\hat{t}}$ и усилия $N_k^{\hat{t}}, T_k^{\hat{t}}$ для момента времени $\hat{t}$. Производится проверка условий наступления очередного события на контакте: при $T_k^{\hat{t}} = T_{Uk}^{\hat{t}}$ – это будет проскальзывание, при $\dot{u}_{\tau k}^{\hat{t}} = 0$ – сцепление, при $N_k^{\hat{t}} = 0$ – выключение связи, при $u_{nk}^{\hat{t}} = 0$ – включение связи. В случае несрабатывания соответствующего условия необходимо повторить уточнение величины $\hat{t}$ в интервале $(t, \hat{t})$ или $(\hat{t}, t + \Delta t)$.

6. При наступлении ожидаемого события производится изменение текущего состояния для соответствующей односторонней связи.

Назначается следующий шаг интегрирования Δt , и шаговый процесс продолжается с пункта 1.

Изложенный алгоритм реализован в вычислительной программе [24], предназначенной для проведения численных исследований различных моделей и алгоритмов решения задач с односторонними связями. Для сравнительной оценки полученных результатов в данной программе также реализованы известные методы расчета систем с односторонними связями и трением, в частности метод итераций по предельным силам трения [17, 18].

Результаты численных исследований

Продemonстрируем рассмотренный подход на примере расчета плоской стержневой системы, которая, например, может моделировать участок трубопровода с перепадом рельефа в условиях динамического нагружения (рис. 2а). Считается, что система закреплена от боковых смещений (т. е. из плоскости xu) и опирается на две жесткие опоры, допускающие отрыв и проскальзывание опирающейся на них конструкции. Находящаяся изначально в состоянии покоя, система нагружается импульсной нагрузкой $P(t)$ с амплитудой 100 кН (рис. 2б). Величины жесткости стержней: $EA = 9 \cdot 10^6$ кН, $EI = 2 \cdot 10^6$ кН·м²; распределенная масса $m = 0,4$ т/м. Матрица демпфирования приближенно считалась пропорциональной матрице масс $[C] = \alpha[M]$, при этом коэффициенты демпфирования $\alpha = 0,2\omega_1$, $\beta = 0$. Для моделирования одностороннего контакта с трением-скольжением на опорах применялись рамно-стержневые контактные элементы [4, 9].

Ввиду относительно большой жесткости сечения трубопровода, проблема динамической устойчивости не рассматривается. Поскольку продолжительность действия импульсной нагрузки (0,1 с) на порядок больше времени прохождения звука на двух размерах пролета (0,008 с), волновыми процессами в балке также пренебрегаем.

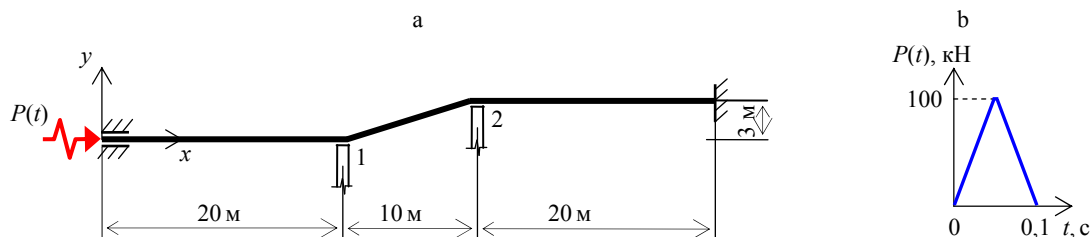


Рис. 2. Стержневая система на односторонних опорах

Fig. 2. Framed system based on unilateral supports

В исходном состоянии нормальные контактные усилия N_k^0 приравнивались усилиям от собственного веса конструкции, при этом $T_k^0 = 0$. С началом динамического воздействия возможны изменения состояния контакта рассчитываемой системы: проскальзывание на опорах и обратный переход в состояние сцепления, а также отрыв от опор и последующий контакт с ними.

Численное решение рассматриваемой задачи как предложенным, так и для сравнительной оценки альтернативным методом производилось с помощью компьютерной программы [24]. Оценивалось влияние величины коэффициента трения f на поведение конструкции при заданной динамической нагрузке. Так, на рис. 3, 4 представлены графики смещений конструкции по времени при ее проскальзывании

или отрыве от первой опоры (значение коэффициента f варьировалось от 0 до 1,3).

Изменение контактных усилий T_k и N_k и состояния опорных контактов по времени (при $f = 1,3$) приводится на рис. 5, 6.

Графики, отображающие зависимости между перемещениями опорных узлов конструкции и значениями коэффициента трения на опоре, представлены на рис. 7.

Достоверность полученных результатов подтверждается программной проверкой выполнения условий равновесия и совместности деформаций системы после каждого шага по времени. Кроме того, для сравнительной оценки результатов выполнялся расчет с использованием альтернативного алгоритма, в котором контактные условия на каждом временном шаге реализуются с помощью метода итераций по предельным силам трения (рис. 5 – пунктир).

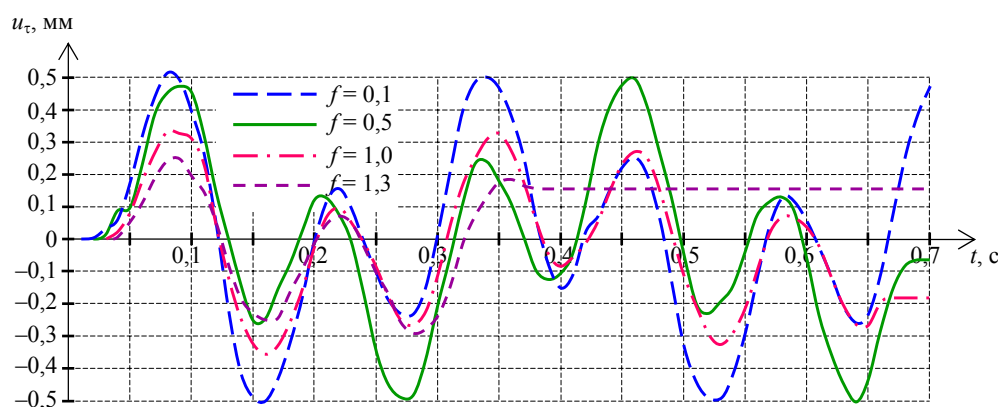


Рис. 3. Горизонтальные смещения конструкции на первой опоре по времени

Fig. 3. Horizontal displacements of structure on the first support in time

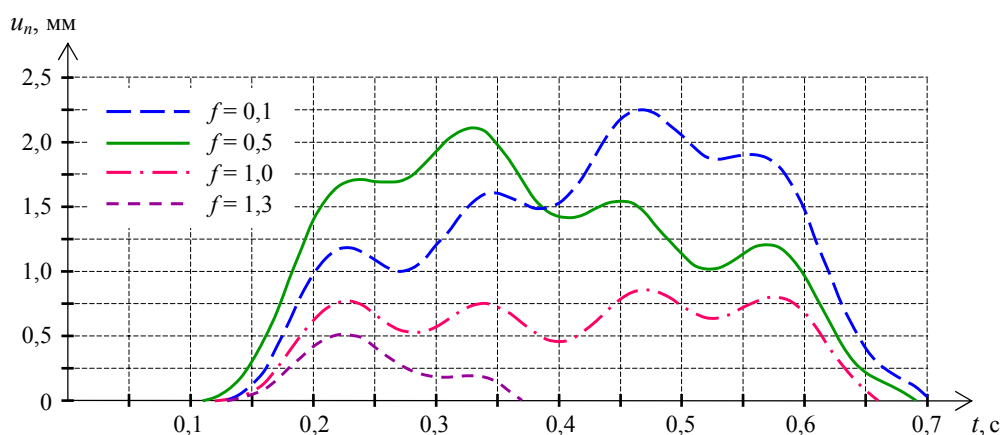


Рис. 4. Вертикальные смещения конструкции на первой опоре по времени

Fig. 4. Vertical displacements of structure on the first support in time

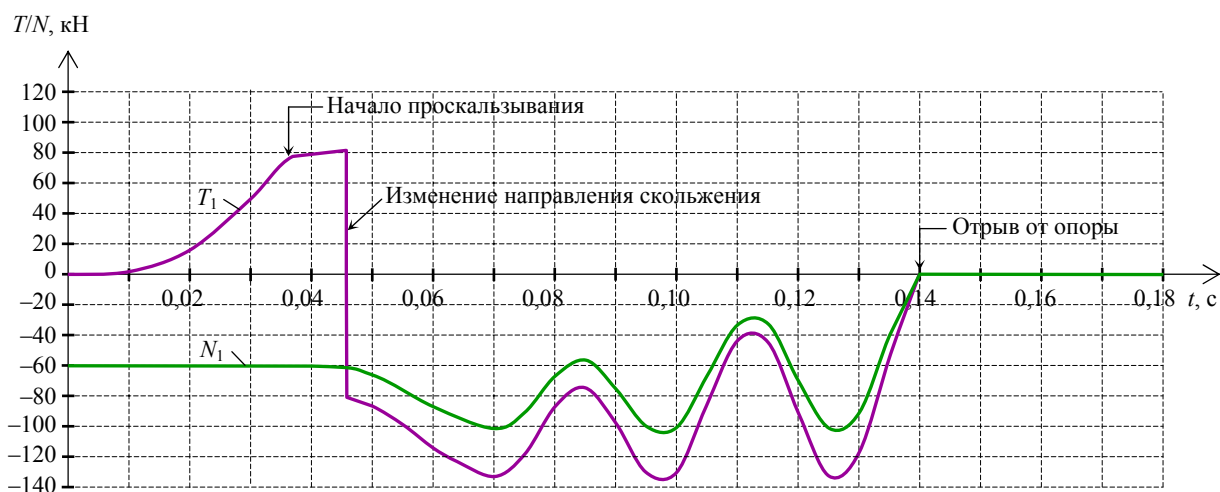


Рис. 5. Изменение величин контактных усилий по времени на первой опоре

Fig. 5. Change of contact forces values in time on the first support

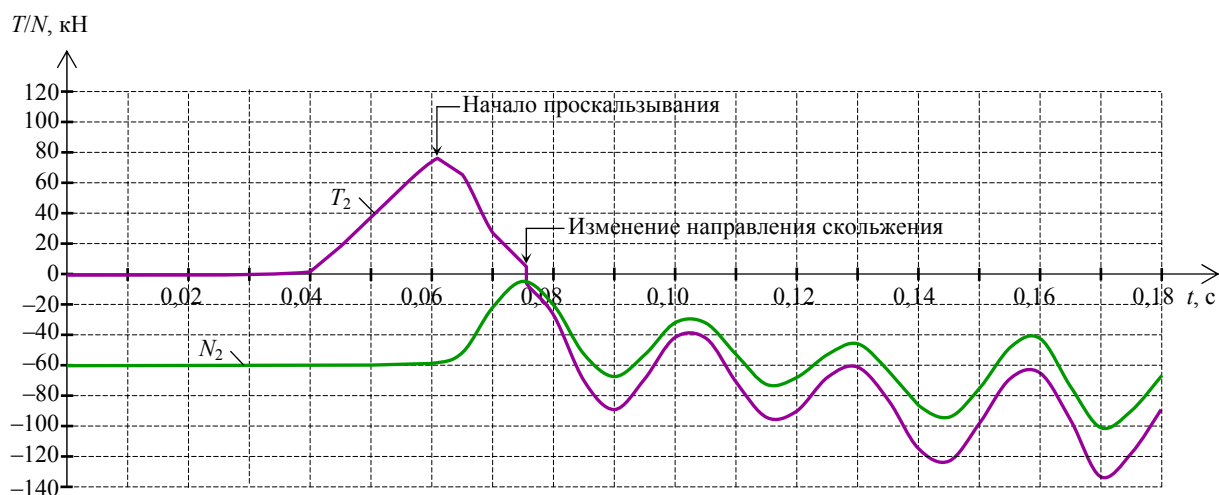


Рис. 6. Изменение величин контактных усилий по времени на второй опоре

Fig. 6. Change of contact forces values in time on the second support

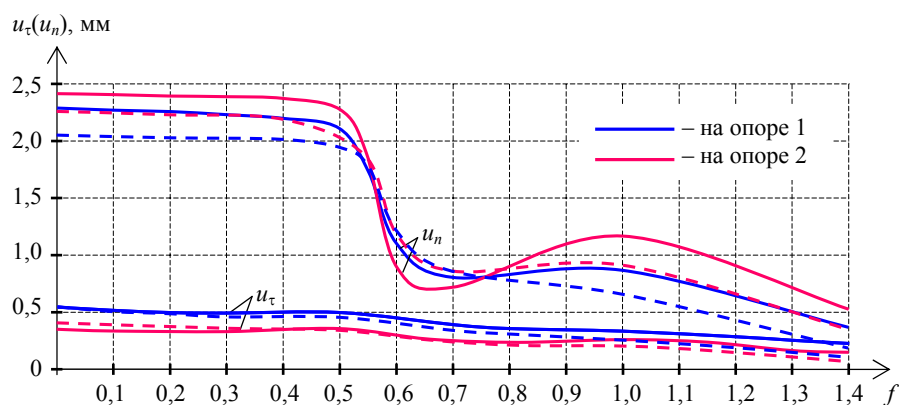


Рис. 7. Амплитуды горизонтальных и вертикальных смещений конструкции на опорах для разных значений коэффициента трения

Fig. 7. Amplitudes of horizontal and vertical structure displacements on supports at different values of friction coefficient

Как видно, результаты расчетов предложенным и альтернативным методами хорошо согласуются между собой, однако алгоритм итераций по предельным силам требует существенно больших затрат времени расчета (для рассмотренной задачи – почти в два раза).

Из приведенных на рис. 3–5 графиков видно, что при возрастании коэффициента трения как горизонтальные, так и вертикальные смещения на опорах уменьшаются. Также сопоставлялись решения, полученные при разных начальных шагах интегрирования. Проведенные численные исследования продемонстрировали хорошую внутреннюю сходимость предложенного алгоритма в достаточно большом диапазоне заданных шагов интегрирования по времени. Надо отметить, что при решении уравнения движения выбор эффективного шага представляет собой трудную задачу [22]. В этом случае рекомендуется задавать начальный шаг по времени таким, чтобы при его увеличении, например в два раза, расхождение в решениях не превышало заданной точности расчета.

Заметим, что хотя предложенный подход проиллюстрирован на примере стержневой системы с дискретными односторонними связями, он может применяться и для расчета контактного взаимодействия континуальных систем. Посредством рассмотренных рамностержневых контактных конечных элементов можно моделировать неидеальные односторонние связи между узлами конечно-элементной сетки, расположенными на контактных поверхностях плоских и пространственных областей, изгибаемой плиты и основания, в зоне деформационных и технологических швов, берегов трещин и т. п. [4, 6, 9, 13, 23].

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрена задача контактного взаимодействия упругодеформируемых систем при динамическом нагружении. Для ее решения предложен численный алгоритм, совмещающий в одном пошаговом процессе интегрирование уравнений движения с пошаговым по времени анализом состояния контакта. Для точного соблюдения ограничений в условиях по предель-

ному трению-скольжению применен способ компенсирующих нагрузок.

2. В основе предложенного подхода лежит пошаговый метод, имеющий ясную физическую интерпретацию. Разработанный алгоритм обеспечивает возможность анализа состояния контакта на каждом временном шаге и имеет преимущество в тех случаях, когда решение задачи зависит от истории нагружения, в частности при динамическом нагружении и учете трения-скольжения в односторонних связях.

3. Используется дискретная расчетная модель метода конечных элементов, при этом для моделирования односторонних связей с кулоновским трением применяются контактные элементы в виде стержневой системы. Данные контактные конечные элементы вводятся между контактирующими поверхностями взаимодействующих тел, обеспечивая дискретный контакт между узлами смежных сеток. Они позволяют определять усилия и смещения в зоне контакта с одинаковой и высокой точностью, применять несогласованные конечно-элементные сетки, учитывать физические и геометрические свойства контактного шва.

4. Проведенные численные исследования позволяют заключить об эффективности разработанного метода, в частности при решении контактных задач с учетом трения и динамического нагружения. Так, сравнение предложенного подхода с известным алгоритмом итераций по предельным силам показывает значительную экономию времени расчета. Кроме того, можно отметить, что возможность учета сложных условий контактного взаимодействия приближает расчетную схему к реальным условиям работы конструкций и тем самым позволяет получать более точную и полную информацию о ее прочности и надежности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айзикович, С. М. Механика контактных взаимодействий / С. М. Айзикович, В. М. Александров, И. И. Аргатов. М.: Физматлит, 2003. 672 с.
2. Wriggers, P. Computational Contact Mechanics / P. Wriggers. Berlin-Heidelberg: Springer, 2006. 521 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-32609-0>
3. Laursen, T. A Contact Searching Algorithm Including Bounding Volume Trees Applied to Finite Sliding Mortar Formulations / T. Laursen, B. Yang // Computational Mechanics. 2008. No 41. P. 189–205. <https://doi.org/10.1007/s00466-006-0116-z>.

4. Bukhartsev, V. N. Stability Assessment of a Structure Subject to Asymmetric Load Application on a Rock-Free Bed / V. N. Bukhartsev, A. A. Lukashevich // *Power Technology and Engineering*. 2012. Vol. 45, No 5. P. 346–350. <https://doi.org/10.1007/s10749-012-0279-z>.
5. Wriggers, P. A Finite Element Method for Contact Using a Third Medium / P. Wriggers, J. Schroder, A. Schwarz // *Computational Mechanics*. 2013. No 4. P. 837–847. <https://doi.org/10.1007/s00466-013-0848-5>.
6. Lukashevich, A. A. Computational Solution of Contact Problems with Unilateral Constraints and Friction by Step-by-Step Analysis / A. A. Lukashevich // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 941–944. P. 2264–2267. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.941-944.2264>.
7. Barboteu, M. Analysis of a Contact Problem with Normal Damped Response and Unilateral Constraint / M. Barboteu, D. Danan, M. Sofonea // *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2016. Vol. 96, No 4. P. 408–428. <https://doi.org/10.1002/zamm.201400304>.
8. Wriggers, P. A Virtual Element Method for Contact / P. Wriggers, W. T. Rust, B. D. Reddy // *Computational Mechanics*. 2016. No 6. P. 1039–1050. <https://doi.org/10.1007/s00466-016-1331-x>.
9. Lukashevich, A. A. Computational Modelling of Stiffness and Strength Properties of the Contact Seam / A. A. Lukashevich // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No 5. P. 149–159. <https://doi.org/10.18720/MCE.81.15>.
10. Lukashevich, A. A. Modelling of Contact Interaction with Allowance for Nonlinear Compliance in Unilateral Constraints. / A. A. Lukashevich, N. K. Lukashevich, E. I. Timohina // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 463, No 042054. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/4/042054>.
11. Бычек, О. В. К исследованию динамического контактного взаимодействия деформируемых тел / О. В. Бычек, В. М. Садовский // *Прикладная механика и техническая физика*. 1998. Т. 39, № 4. С. 167–173.
12. Аннин, Б. Д. Динамические контактные задачи теории упругости и пластичности / Б. Д. Аннин, О. В. Садовская, В. М. Садовский // *Вопросы материаловедения*. 2003. № 1. С. 426–434.
13. Бухарцев, В. Н. Решение задачи о взаимодействии водобойной плиты крепления с основанием при пульсации давления в сбрасываемом потоке / В. Н. Бухарцев, А. А. Лукашевич // *Гидротехническое строительство*. 2010. № 4. С. 52–55.
14. Никонов, С. А. Особенности виртуального моделирования динамических процессов в механических системах с удерживающими связями с помощью пакета Adams / С. А. Никонов, А. А. Матюков, Н. В. Островская // *Морские интеллектуальные технологии*. 2018. № 1–4. С. 223–228.
15. Application of the Schwarz Alternating Method for Simulating the Contact Interaction of a System of Bodies / M. P. Galanin [et al.] // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2015. Vol. 55, No 8. P. 1393–1406. <https://doi.org/10.1134/S0965542515080102>.
16. Galanin, M. P. Use of Various Versions of Schwarz Method for Solving the Problem of Contact Interaction of Elastic Bodies / M. P. Galanin, V. V. Lukin, A. S. Rodin // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*. 2018. Vol. 991, No 012021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/991/1/012021>.
17. Кравчук, А. С. Вариационный метод в контактных задачах. Состояние проблемы, направления развития / А. С. Кравчук // *Прикладная математика и механика*. 2009. Т. 73, № 3. С. 492–502.
18. Sofonea, M. Analysis of a Sliding Frictional Contact Problem with Unilateral Constraint / M. Sofonea, Y. Souleiman // *Mathematics and Mechanics of Solids*. 2017. No 22. P. 324–342. <https://doi.org/10.1177/1081286515591304>.
19. Barboteu, M. Analysis of a Contact Problem with Unilateral Constraint and Slip-Dependent Friction / M. Barboteu, X. Cheng, M. Sofonea // *Mathematics and Mechanics of Solids*. 2016. No 21. P. 791–811. <https://doi.org/10.1177/1081286514537289>.
20. Barauskas, R. Dynamic Analysis of Structures with Unilateral Constraints: Numerical Integration and Reduction of Structural Equations / R. Barauskas // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1994. No 2. P. 323–342. <https://doi.org/10.1002/nme.1620370209>.
21. A Numerical Approach to the Dynamic Unilateral Contact Problem of Soil-Pile Interaction under Instabilizing and Environmental Effects / A. Liolios [et al.] // *Numerical Methods and Applications*, 6th International Conference, 2006, Borovets, Bulgaria, August 20–24. P. 646–651. https://doi.org/10.1007/978-3-540-70942-8_78.
22. Bathe, K.-J. Numerical Methods in Finite Element Analysis / K.-J. Bathe, E. L. Wilson. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1976. 528 p. <https://doi.org/10.1002/nme.1620110913>.
23. Lukashevich, A. A. Numerical Decision of Problems of Structural Mechanics with Nonideal Unilateral Constraints / A. A. Lukashevich, L. A. Rozin // *Applied Mechanics and Materials*. Advances in Civil and Industrial Engineering IV. 2014. Vol. 580–583. P. 2932–2935. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.580-583.2932>.
24. Программа решения задач контактного взаимодействия с учетом односторонних связей и трения методом конечных элементов: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008610113; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ / А. А. Лукашевич. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам РФ, 2008. 1 с.

Поступила 17.12.2019

Подписана в печать 25.02.2020

Опубликована онлайн 29.01.2021

REFERENCES

1. Aizikovich S. M., Aleksandrov V. M., Argatov I. I. (2003) *Mechanics of Contact Interaction*. Moscow, Fizmatlit Publ. 672 (in Russian).
2. Wriggers P. (2006) *Computational Contact Mechanics*. Berlin-Heidelberg, Springer. 521. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-32609-0>.
3. Laursen T., Yang B. (2008) A Contact Searching Algorithm Including Bounding Volume Trees Applied to Finite Sliding Mortar Formulations. *Computational Mechanics*, (41), 189–205. <https://doi.org/10.1007/s00466-006-0116-z>.

4. Bukhartsev V. N., Lukashevich A. A. (2012) Stability Assessment of a Structure Subject to Asymmetric Load Application on a Rock-Free Bed. *Power Technology and Engineering*, 45 (5), 346–350. <https://doi.org/10.1007/s10749-012-0279-z>.
5. Wriggers P., Schroder J., Schwarz A. (2013) A Finite Element Method for Contact Using a Third Medium. *Computational Mechanics*, (4), 837–847. <https://doi.org/10.1007/s00466-013-0848-5>.
6. Lukashevich A. A. (2014) Computational Solution of Contact Problems with Unilateral Constraints and Friction by Step-by-Step Analysis. *Advanced Materials Research*, 941–944, 2264–2267. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.941-944.2264>.
7. Barboteu M., Danan D., Sofonea M. (2016) Analysis of a Contact Problem with Normal Damped Response and Unilateral Constraint. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 96 (4), 408–428. <https://doi.org/10.1002/zamm.201400304>.
8. Wriggers P., Rust W. T., Reddy B. D. (2016) A Virtual Element Method for Contact. *Computational Mechanics*, (6), 1039–1050. <https://doi.org/10.1007/s00466-016-1331-x>.
9. Lukashevich A. A. (2018) Computational Modelling of Stiffness and Strength Properties of the Contact Seam. *Inzhenerno-Stroitelny Zhurnal = Magazine of Civil Engineering*, (5), 149–159. <https://doi.org/10.18720/MCE.81.15>.
10. Lukashevich A. A., Lukashevich N. K., Timohina E. I. (2018) Modelling of Contact Interaction with Allowance for Nonlinear Compliance in Unilateral Constraints. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 463 (042054). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/4/042054>.
11. Bychek O. V., Sadovskii V. M. (1998) On Investigation of the Dynamic Contact Interaction of Deformable Bodies. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 39 (4), 628–633. <https://doi.org/10.1007/bf02471260>.
12. Annin B. D., Sadovskaya O. V., Sadovskii V. M. (2003) Dynamic Contact Problems of Elastoplasticity. *Voprosy Materialovedeniya*, (1), 426–434 (in Russian).
13. Bukhartsev V. N., Lukashevich A. A. (2010) Solution of Problem on Interaction of Water-Fight Plate at a Pressure Pulsation in Dumped Stream. *Gidrotekhnicheskoye Stroitelstvo*, (4), 52–55 (in Russian).
14. Nikonov S. A., Matyukov A. A., Ostrovskaya N. V. (2018) Features of Virtual Simulation of Dynamic Processes in Mechanical Systems with Bilateral Constraints Using the Adams Package. *Morskiye Intellektualnye Tekhnologii = Marine Intellectual Technologies*, (1–4), 223–228 (in Russian).
15. Galanin M. P., Lukin V. V., Rodin A. S., Stankevich I. V. (2015) Application of the Schwarz Alternating Method for Simulating the Contact Interaction of a System of Bodies. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 55 (8), 1393–1406. <https://doi.org/10.1134/S0965542515080102>.
16. Galanin M. P., Lukin V. V., Rodin A. S. (2018) Use of Various Versions of Schwarz Method for Solving the Problem of Contact Interaction of Elastic Bodies. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 991 (012021). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/991/1/012021>.
17. Kravchuk A. S. (2009) The Variational Method in Contact Problems. The Present State of the Problem and Trends in its Development. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 73 (3), 351–357. <https://doi.org/10.1016/j.japmathmech.2009.07.004>.
18. Sofonea M., Souleiman Y. (2017) Analysis of a Sliding Frictional Contact Problem with Unilateral Constraint. *Mathematics and Mechanics of Solids*, (22), 324–342. <https://doi.org/10.1177/1081286515591304>.
19. Barboteu M., Cheng X., Sofonea M. (2016) Analysis of a Contact Problem with Unilateral Constraint and Slip-Dependent Friction. *Mathematics and Mechanics of Solids*, (21), 791–811. <https://doi.org/10.1177/1081286514537289>.
20. Barauskas R. (1994) Dynamic Analysis of Structures with Unilateral Constraints: Numerical Integration and Reduction of Structural Equations. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, (2), 323–342. <https://doi.org/10.1002/nme.1620370209>.
21. Liolios L., Iossifidou K., Liolios K., Abdalla K., Radev S. (2006) A Numerical Approach to the Dynamic Unilateral Contact Problem of Soil-Pile Interaction under Instabilizing and Environmental Effects. *Numerical Methods and Applications*, 6th International Conference, Borovets, Bulgaria, August 20–24, 646–651. https://doi.org/10.1007/978-3-540-70942-8_78.
22. Bathe K.-J., Wilson E. L. (1976) *Numerical Methods in Finite Element Analysis*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall. 528. <https://doi.org/10.1002/nme.1620110913>.
23. Lukashevich A. A., Rozin L. A. (2014) Numerical Decision of Problems of Structural Mechanics with Nonideal Unilateral Constraints. *Applied Mechanics and Materials*, 580–583, 2932–2935. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.580-583.2932>.
24. Lukashevich A. A. (2008) *The Program for Solving Contact Interaction Problems Taking into Account Unilateral Constraints and Friction by the Finite Element Method*: Certificate of State Registration of Computer Program No 2008610113; Registered in Register of Computer Programs. Federal Service for Intellectual Property, Patent and Trademarks of the Russian Federation. 1 (in Russian).

Received: 17.12.2019

Accepted: 25.02.2020

Published online: 29.01.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-26-32>

UDC 629.113.585

Control of Pneumatic Actuator for Automated Mechanical Transmission Dry Friction Clutch Base on the Pulse Width Modulation Signal

S. V. Kharytonchyk¹⁾, V. A. Kussyak¹⁾, Le Van Nghia²⁾

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

²⁾Hanoi University of Science and Technology (Hanoi, Socialist Republic of Vietnam)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Abstract. To ensure quality of dry friction clutch engagement in automated mechanical transmission during vehicle starting-up and maneuvering the control range of clutch actuator has to be maximum wide. It depends on the consistency of the clutch actuator geometric parameters with the electrical characteristics of the used solenoid valves, the output stage of the controller and the PWM control signal frequency. In addition to precision electronic control the driver must be able to “manually” operate the dry friction clutch in emergency. That is why friction clutch must have two independent control circuits. The original automated drive with a duplicate pneumohydraulic circuit for the friction clutch is presented in the paper, as well as the research results of the PWM frequency influence on operating range of the clutch pneumatic actuator. The research was based on the analysis of semi-natural experiment for assessing the functional performance of the designed automated mechatronic control system for the truck mechanical transmission. Ecomat R360 controllers were used as a hardware base of the test bench information control system. The developed software for the controller with one-parameter feedback on the clutch release lever movement allows to provide the PWM signal of varying duty ratio to the proportional solenoid valve of the automated drive. A graphical representation of the research results was performed with visualization possibilities of CoDeSys V2.3. During the semi-natural experiment, the polynomial dependence between variation of the clutch actuator control range and the generated PWM signal frequency in the range up to 400 Hz was revealed as well as practical recommendations on the choice of the optimum PWM signal frequency are also given in activity. The research results can be used in an adaptive control algorithm for automated mechanical transmission of trucks and road trains to ensure precise control of the clutch actuator in the starting-up and maneuvering processes.

Keywords: automated mechanical transmission, automated mechatronic system, dry friction clutch, automated drive, pneumatic actuator, proportional solenoid valve, PWM

For citation: Kharytonchyk S. V., Kussyak V. A., Le Van Nghia (2021) Control of Pneumatic Actuator for Automated Mechanical Transmission Dry Friction Clutch Base on the Pulse Width Modulation Signal. *Science and Technique*. 20 (1), 26–32. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-26-32>

Управление пневматическим исполнительным механизмом сухого фрикционного сцепления автоматизированной механической трансмиссии на основе модулированного широтно-импульсного сигнала

Докт. техн. наук С. В. Харитончик¹⁾, канд. техн. наук, доц. В. А. Кусяк¹⁾,
канд. техн. наук Ле Ван Нгиа²⁾

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

²⁾Ханойский университет науки и технологий (Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам)

Реферат. Для обеспечения качества включения сухого фрикционного сцепления в автоматизированной механической трансмиссии в процессе трогания транспортного средства с места и маневрирования диапазон управления

Адрес для переписки

Кусяк Виктор Анатольевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 296-65-14
v.kussyak@bntu.by

Address for correspondence

Kussyak Victor A.
Belarusian National Technical University
12, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 296-65-14
v.kussyak@bntu.by

исполнительным механизмом сцепления должен быть максимально широким. Ширина диапазона зависит от согласованности геометрических параметров исполнительного механизма сцепления с электрическими характеристиками используемых электромагнитных клапанов, выходным каскадом контроллера и частотой управляющего ШИМ-сигнала. Помимо прецизионного электронного управления водителю должен иметь возможность «вручную» управлять сухим фрикционным сцеплением в аварийной ситуации, вследствие чего последнее должно иметь два независимых контура управления. В статье представлены оригинальный автоматизированный привод фрикционного сцепления с дублирующим пневмогидравлическим контуром, а также результаты исследования влияния частоты ШИМ-сигнала на рабочий диапазон управления пневматическим исполнительным механизмом сцепления. Исследования базировались на анализе результатов полунатурного эксперимента по оценке функциональной работоспособности спроектированной автоматизированной мехатронной системы управления механической трансмиссией грузового автомобиля. В качестве аппаратной основы информационной системы управления испытательным комплексом использовались контроллеры Ecomat R360. Разработанное программное обеспечение контроллеров с однопараметрической обратной связью по перемещению рычага выключения сцепления позволяет подавать ШИМ-сигнал переменной скважности на пропорциональный электромагнитный клапан автоматизированного привода. Графическое представление результатов исследований производилось с помощью средств визуализации CoDeSys V2.3. В ходе полунатурного эксперимента выявлена полиномиальная зависимость между изменением диапазона управления исполнительным механизмом сцепления и частотой генерируемого ШИМ-сигнала в интервале до 400 Гц, а также даны практические рекомендации по выбору оптимальной частоты модулированного широтно-импульсного сигнала. Результаты исследований могут быть использованы в адаптивном алгоритме управления автоматизированной механической трансмиссией грузовых автомобилей и автопоездов для обеспечения прецизионного управления исполнительным механизмом сцепления в процессах трогания с места и маневрирования.

Ключевые слова: автоматизированная механическая трансмиссия, автоматизированная мехатронная система, сухое фрикционное сцепление, автоматизированный привод, пневматический исполнительный механизм, пропорциональный электромагнитный клапан, широтно-импульсная модуляция

Для цитирования: Харитончик, С. В. Управление пневматическим исполнительным механизмом сухого фрикционного сцепления автоматизированной механической трансмиссии на основе модулированного широтно-импульсного сигнала / С. В. Харитончик, В. А. Кусяк, Ле Ван Нгиа // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 1. С. 26–32. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-26-32>

Overview of transmission mechatronic systems showed that automated drive of dry friction clutch has, as a rule, an additional duplicate control circuit [1–5]. The electronic components of mechatronic systems, despite their relatively high reliability, characterized by intermittent faults and suddenness of failures occurrence. Additionally, working medium may leak from the actuator circuit that reduces or eliminates the control system operability and vehicle mobility.

Considering the above, as well as using the experience of foreign companies, specialists of the BNTU Automobile Department have developed an original duplex drive [6] of dry friction clutch, which is integrated into powertrain control mechatronic system (Fig. 1) and has two independent control loops.

Automated drive, as the primary circuit, includes a pneumatic actuator 14 and the proportional solenoid valve 13 installed on the gearbox (Fig. 1). Duplicate hydraulic drive consists of a pedal 8 with a hydraulic cylinder 7, pipeline and pneumo-hydraulic booster 6 (Fig. 1, 2). Clutch release node is a lever mechanism, which consists of two levers 16 and 17 mounted on the bush of clutch fork shaft. One of the levers is connected

with a power actuator of the clutch automated drive. Another one comes into the duplicate hydraulic drive.

Calculation of the actuator active diameter is based on the maximum clutch disengagement force, the drive ratio and system's nominal pressure. When designing automated dry clutch for serial production, the actuator active diameter is tended to choose from a standard series of pneumatic cylinders. As known well about actuator on cylindrical type, the dead zone and friction between the piston and the cylinder surface are changed during operation of the vehicle, that influence on the control quality of the clutch transition process. At the test stand of the BNTU, a brake chamber (type 16) with diaphragm type was used as a clutch actuator to improving the control quality by reducing the dead zone and friction.

At the clutch engagement in the automatic mode, for example during starting or maneuvering, in order to control proportional solenoid valve 13, the strategy of the Direct Semi-Active Control [7] is offered to use. The meaning of the strategy is applied to the solenoid coil PWM signal with a subsequent change of its duty ratio according to a predetermined algorithm.

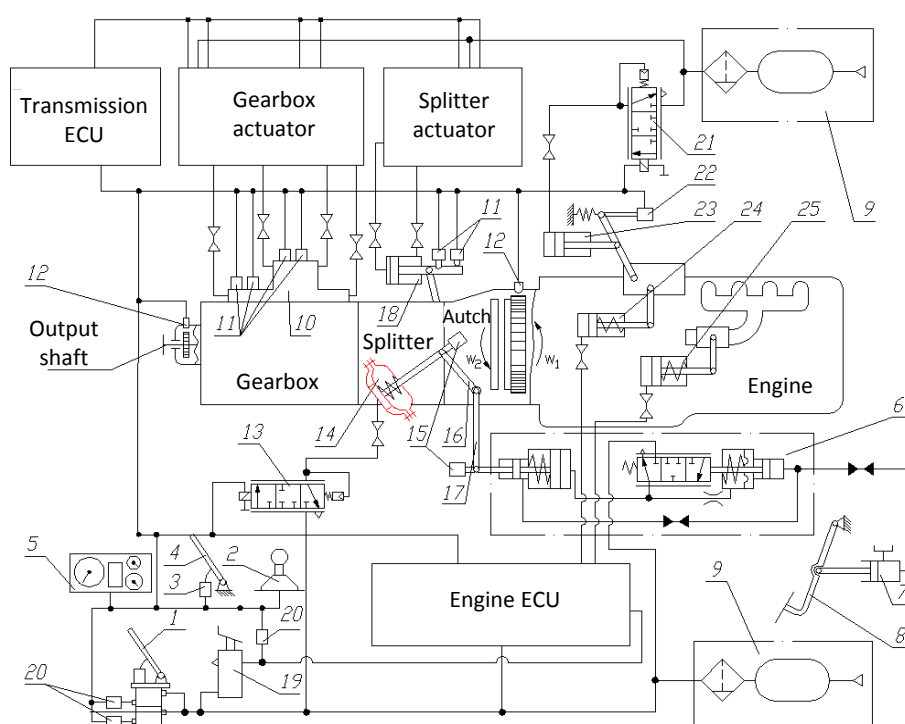


Fig. 1. Schematic diagram of powertrain control mechatronic system with clutch duplex drive:

- 1 – brake pedal; 2 – mode selector; 3 – position sensor; 4 – accelerator pedal; 5 – display; 6 – pneumo-hydraulic booster; 7 – hydraulic cylinder; 8 – clutch pedal; 9 – air supply; 10 – gearbox actuator; 11 – contact sensors; 12 – speed sensors; 13, 21 – proportional solenoid valves; 14 – clutch actuator; 15, 22 – displacement sensors; 16, 17 – clutch release levers; 18 – splitter actuator; 19 – auxiliary brake valve; 20 – pressure sensors; 23 – engine actuator; 24 – pneumatic cylinder for engine turn off; 25 – engine brake actuator

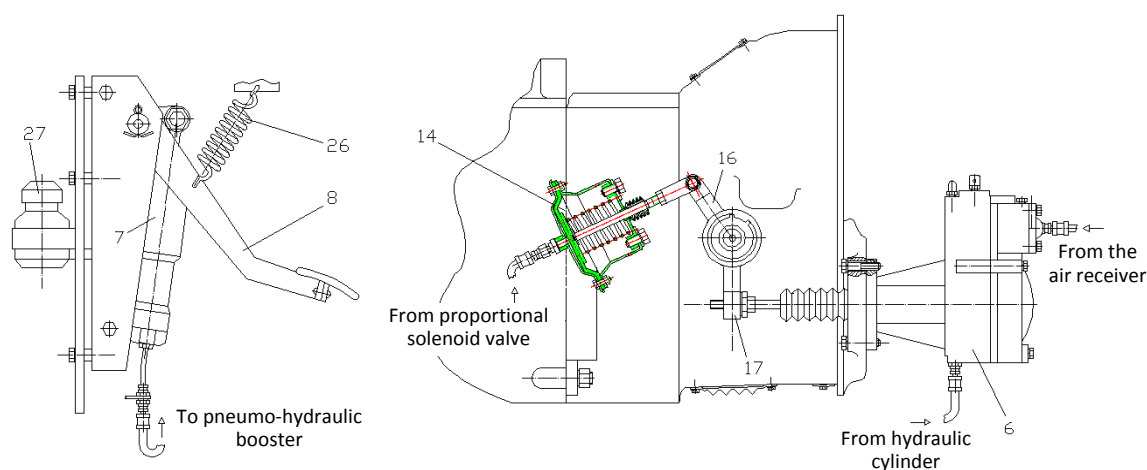


Fig. 2. Duplex drive of dry friction clutch: 6 – pneumo-hydraulic booster; 7 – hydraulic cylinder; 8 – clutch pedal with return spring 26; 14 – clutch actuator; 16, 17 – clutch release levers; 27 – expansion tank

At all transient processes electronic system has to provide such a clutch engagement tempo that would to avoid dynamic overloads in the transmission on the one hand and not to exceed the criterial limits for energy loading of friction clutch, evaluated by specific work and power of slipping [8], on the other.

If the mode selector 2 is subsequently set by the driver (Fig. 1) to the “D” position (drive) and

the accelerator pedal is pressed, the transmission ECU sends a signal to the clutch control proportional solenoid valve 13 and in parallel by CAN the information about the current position mode selector and accelerator pedal 4 is transmitted to the engine ECU. As soon as the clutch is disengaged, the transmission ECU generates sequential control signals to the solenoid valve block

of gearbox and splitter actuators for the first selecting the rod, and then enabling the optimum gear step by actual driving conditions as: actual vehicle speed and mass, the rotation speeds of the engine crankshaft and driving wheels, the number of the previous gear steps. After that, the signal on the solenoid valve 13 is modified and the clutch is engaged on the set rate. Depending on the degree to which the clutch is engaged, the fuel supply gradually increases in proportion to the position of the accelerator pedal set by the driver in the initial phase.

AMT start-up adaptive algorithm [9] in the automatic mode of the power unit is the following sequence of operations: transmission mode selector control – full clutch disengagement – main and additional gearbox control – engine control – full clutch engagement.

After moving the mode selector 2 to the “D” (drive) position (Fig. 1), the driver presses on the accelerator pedal 4 for vehicle starting-up. The proportionality between the pedal rotation angle (by position sensor 3) and the movement of the fuel injection pump regulator lever (by displacement sensor 22) is provided by the engine ECU by pulse-width modulation (PWM) signal to a proportional solenoid valve 21 with using feedback on the movement of the fuel injection pump regulator lever and the engine crankshaft rotation frequency [10]. The required rate of vehicle start-up is determined by the “gas” pedal press speed, on the basis of which the transmission ECU calculates the pro-required clutch engagement rate and the enable gear number. In parallel, while receiving signals from the mode selector limit switch, the engine speed sensor, the fuel supply position sensor and the accelerator pedal position sensor, the transmission ECU generates a control signal to open the proportional solenoid valve 13. The valve is activated and the compressed air comes from the receiver of the supply part 9 into the clutch actuator 14 (pneumatic chamber), as the result of which the clutch is disengaged. After working out the signal from the clutch lever sensor 15, the transmission ECU sequentially generates signals to the solenoid valve block of the gearbox actuator, as well as the air-control valve for shifting the splitter. After shifting on the required gear (the respective gearshift limit switches are closed), the transmission ECU sends a PWM-signal to the proportional solenoid valve 13, increasing the duty cycle of the signal by a certain amount depending on the “gas” pedal press speed. The compressed air from the clutch actuator – pneumatic chamber 14

through the proportional solenoid valve 13 is gradually discharged into the atmosphere, providing the required clutch engagement rate. To avoid “overloading” of the clutch, feedback is introduced into the control circuit according to the increment by time of difference between angular velocities of the driving and driven clutch parts ($d\Delta\omega/dt$). The feedback is also entered into the engine control circuit to avoid ICE stalling by the reduction in the crankshaft angular velocity ω_1 while the clutch is engaging.

Control algorithm adaptation occurs when the mechanical and (or) electrical characteristics of the mechatronic system components vary, as well as the driving behavior or the vehicle weight state change.

The functionality of the developed AMT mechatronic system (Fig. 1) and the operational integrity of the vehicle start-up adaptive algorithm are confirmed by the result of a semi-real experiment on test complex BNTU.

Clearly, that the control quality of dry friction clutch will depend on the width of the PWM signal range. The range value is influenced by the consistency of the actuator geometrical parameters, solenoid valve operating characteristics and the controller output stage. At constant parameters of the last dominant influence on control range has generated the PWM signal frequency.

For debugging powertrain automated mechatronic system a special test bench was created in the laboratory of the BNTU Automobile Department. The test bench consists of diesel engine, dry friction clutch, mechanical gearbox, inertial mass and a load device. Ecomat R360 controllers of CR2500 series were used as a hardware basis of the designed control system.

To investigate the influence of PWM signal frequency to control range of clutch actuator, a special software has developed. It allows to initialize the signal generator and to provide the PWM signal of varying duty ratio (but a certain frequency) in automatic mode to the proportional solenoid valve VEP 3121-1 that controls the clutch actuator. During the experiments, PWM frequency was varied from 150 to 250 Hz in steps of 10 Hz. The clutch lever position, fixed by the potentiometric sensor MY-615A of angular displacements, was used as a feedback. A graphical representation of the semi-natural experiment results was performed with visualization possibilities of CoDeSys V2.3. Some records of engagement/disengagement of dry friction clutch are shown at Fig. 3.

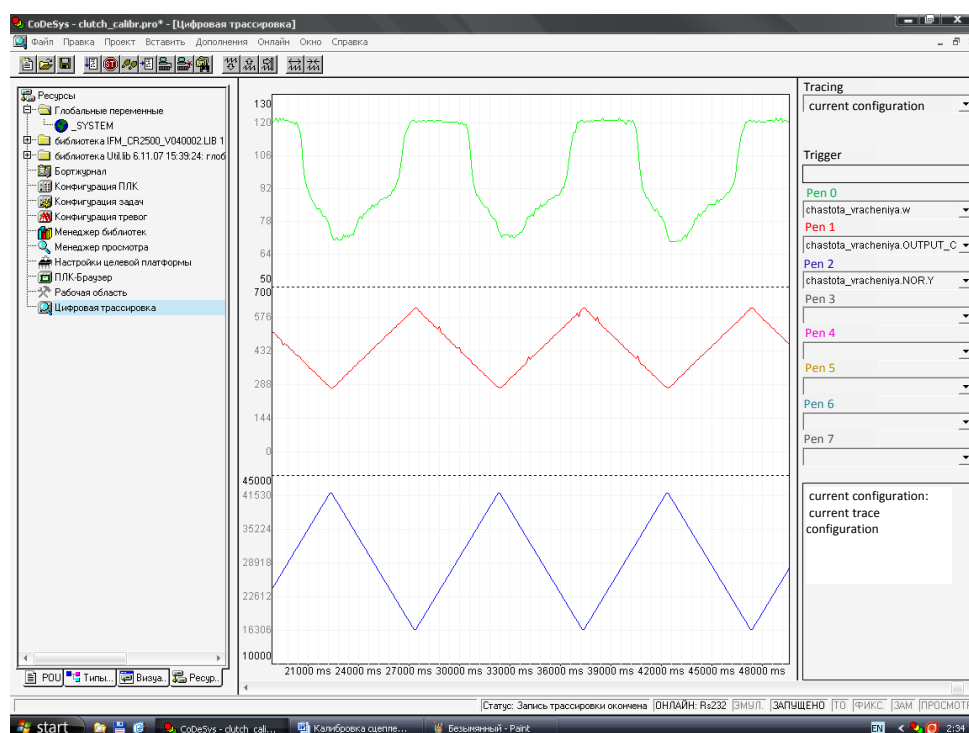


Fig. 3. Oscillogram of clutch engagement/disengagement process at PWM frequency of 150 Hz:
first screen – digitizing the signal from the clutch lever position sensor, bits;
second screen – current to the coils of the solenoid valve, mA; third screen – PWM reload value, bit

As shows the results of experiments the PWM signal range was the greatest at a frequency of 150 Hz. Its value was 40.7 %. There is a steady trend towards a narrowing of the control range with frequency increasing. Already at 200 Hz control range decreased by 26.04 % and was 30.1 %. At 250 Hz the range decreased by 34.15 % and was 26.8 %. The above described control range dependence of the PWM frequency is illustrated in Fig. 4.

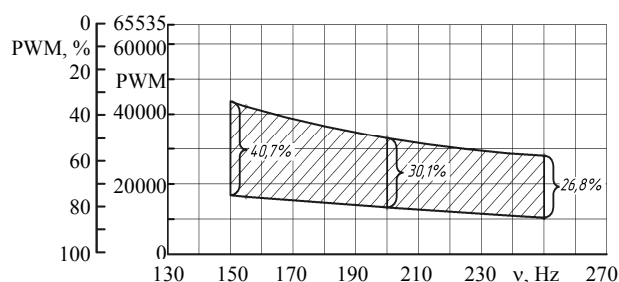


Fig. 4. Control range dependence of the PWM signal frequency

During the vehicle operation, the friction plates of the clutch are wore and resulting of which is a change in the control range of actuator. To improve the quality of the clutch transition process when starting-up vehicle, adaptation of the control

algorithm is required. Adaptation to control range of clutch actuator can be implemented at the software level by the dependence of the control range variation on the PWM signal frequency in an analytical form. The dependence of the control range variation on the frequency of the control PWM signal can be expressed by an approximating polynomial whose coefficients are obtained by processing experimental data using the Polyfit function [11, p. 379] in the MatLab package.

Justification of the polynomial degree choice was carried out on the basis of the smallest modules criterion MAPE (Mean absolute percentage error) [12, p. 1104, (1)], which makes a possible to estimate the approximation error by the formula

$$\text{MAPE} = \frac{1}{h} \sum_{j=1}^h \frac{|e_j|}{y_j} \cdot 100\% = \frac{1}{h} \sum_{j=1}^h \frac{|y_j - y_j^p|}{y_j} \cdot 100\%, \quad (1)$$

where e_j – prediction step error; y_j , y_j^p – actual and predicted trend point value (PWM control range, %); h – number of points.

The errors calculation results of the approximating by polynomial on various degree are presented in Tab. 1.

Table 1

The errors of the approximating polynomial

Coefficient	Degree of approximating polynomial				
	I	II	III	IV	V
b_0	59.91281818	118.1773636	142.5556	177.362515	161.286182
b_1	-0.14097090	-0.73855599	-1.1155831	-1.83458	-1.4192847
b_2	—	-0.00149396	0.003407	0.0089159	0.00466
b_3	—	—	-3.19E-06	-2.17E-05	-1.22E-07
b_4	—	—	—	2.32E-08	-3.13E-08
b_5	—	—	—	—	5.45E-11
Criterion MAPE, %	3.630	0.224	0.088	1.328	0.117

For a given approximation error less than 0.1 %, the dependence of the control range variation on the frequency of the control PWM signal is described by a 3rd order polynomial as in formula

$$D_{\text{PWM}} = 142.56 - 1.116v + 0.0034v^2 - 3.19E-06v^3, \quad (2)$$

where D_{PWM} – control rate of clutch actuator, %; v – frequency of control PWM signal, Hz.

The variation of PWM frequency does not influence on the current range. During the clutch lever movement the magnitude of the current to the solenoid valve coils varies from 0.272 to 0.614 A (Fig. 3), i. e. operating current range is 0.342 A. Taking into account operating characteristic of the used solenoid valve and its zone of stable operation it is 50.3 %, which is a satisfactory result. Clutch actuator hysteresis is shown in Fig. 5.

Clutch actuator hysteresis should be integrated in AMT adaptive control algorithm of vehicle starting-up process. The semi-real experience results of start-up process when debugging of AMT adaptive control algorithm with PWM frequency 150 Hz on test complex BNTU are shown in Fig. 6.

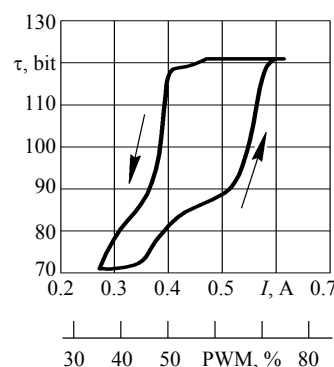


Fig. 5. Clutch actuator hysteresis: I – current to the solenoid valve, A; τ – digitizing the signal from the clutch lever position sensor, bit

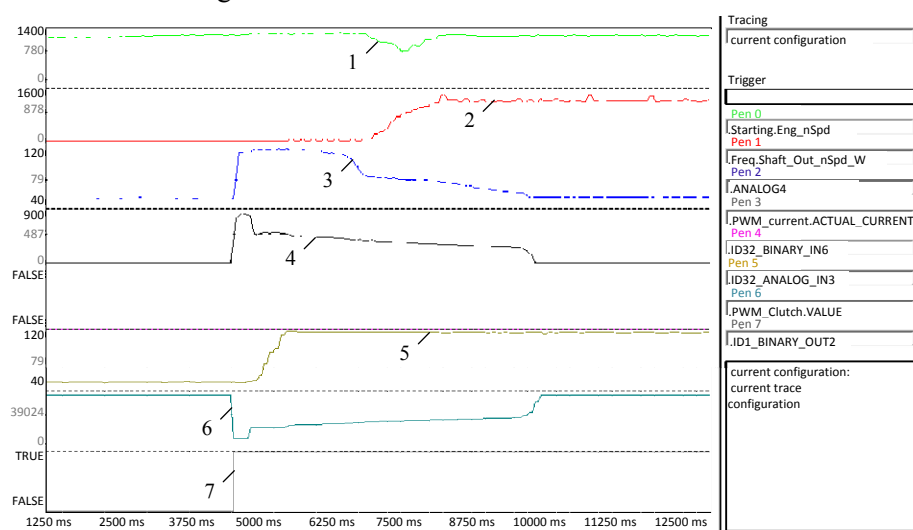


Fig. 6. Oscillograms of start-up process on test stand BNTU: 1, 2 – engine crankshaft speed ω_1 and driven clutch part speed ω_2 , rev/min; 3 – movement of the clutch lever, bit; 4 – current on clutch control valve, mA; 5 – movement of the splitter shift lever, bit; 6 – PWM, bit; 7 – sign stage «1» straight line of splitter solenoid control valve

CONCLUSION

The research has shown that the PWM frequency has a significant influence on the actuator control range: change in frequency of 50 Hz results in a change of the PWM control range for about 4–10 % (Fig. 4). However, at too high or low frequencies valve coils heating or periodic instability of the whole system is possible. The last one expressed in a substantial increment of clutch lever displacement with a slight change of the PWM signal. Therefore, the choice of the optimum frequency must be done on the basis of the specific features of the designed system.

REFERENCES

1. Brugger F., Moser F., Ruhl T. (1988) *Clutch Operating Cylinder for a Pressure-Medium Operated Clutch*: Pat. USA No 4745999.
2. Bates J. (1999) *Actuator System for Vehicle Automated Clutches with Electric Motor Actuator and Pressurized Fluid Override*: Pat. USA No 5934432.
3. Inoue A. (2003) *Clutch Operating System and a Hydraulic Mechanism Used in the Same*: Pat. USA No 6607060 B2.
4. Leigh-Monstevens K. V., Branum L. P. (1991) *Dual Mode Motor Vehicle Clutch Control System*: Pat. USA No 5002166.
5. Ishihara M., Yamamoto Y. (1999) *Clutch Disconnection/Connection Device*: Pat. USA No 5954176.
6. Bakhanovich A., Kussyak V., Filimonov A., Belevich A. (2013) *Automated Dry Friction Drive Vehicle Clutch*: Pat. Republic of Belarus No 20801 (in Russian).
7. Lee H.-W., Oh J.-S., Jung G.-H. (2000) A Study on Full Electronic Control of Automatic Transmission: Direct Active Shift Control. *F2000A101: Materials of FISITA World Automotive Congress, Seoul, Korea*, 1–6.
8. Rukteshel O. S., Kussyak V. A. (2002) Modelling of Pre-Selector Gearshift in the Urban Bus Transmission. *SAE Technical Paper Series*, 2002-01-2203. <https://doi.org/10.4271/2002-01-2203>.
9. Nghia Le Van, Kussyak V. A., Nguyen T. H. (2017) The Research on Threshold Values Determination of One-Parameter Feedback in the Automated Friction Clutch Control Circuit for Truck Start-Up Process. *Paper from the 10th National Conference on Mechanical Engineering, 8–9 Decem., Le Quy Don Technical University and Vietnam Association of Mechanic, Hanoi, Vietnam*. Hanoi, LQDTU, 25–32.
10. Bakhanovich A. G., Kussyak V. A., Gurin A. N., Van Ngia Le (2017) Electronic Control of Diesel Engine Fuel Supply Based on Programmed PID Control. *Nauka i Tekhnika = Science and Technology*, 16 (1), 28–37. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-1-28-37> (in Russian).
11. Anufriev I. E. (2004) *Self-Instruction Manual MatLab 5.3*. St. Petersburg, BHV-Petersburg. 720 (in Russian).
12. Romanov A. A. (2011) Application of the F-Transformation Method for Forecasting the Trend and Numerical Representation of the Time Series. *Izvestiya Samar-skogo Nauchnogo Tsentra Rossiiskoi Akademii Nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 13 (4), 1103–1109 (in Russian).

Received: 17.11.2020

Accepted: 15.01.2021

Published online: 29.01.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-33-36>

UDC 629.365/367 (0758)

Automated Tire Pressure Control System for Multi-Purpose Wheeled Vehicles

V. P. Boikov¹⁾, V. V. Guskov¹⁾, A. S. Pavarekha¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Abstract. The cross-country capability of multi-purpose wheeled vehicles is one of the most important operational properties of these technical objects. In many ways, it is determined by their traction characteristics. There are a number of ways to improve traction and coupling properties of multipurpose wheeled vehicles, the main ones are the use of various kinds of traction control systems, blocking of interaxle and interwheel differentials, the use of ballast and several others. Recently, one of the ways to improve the traction properties and cross-country ability of vehicles on soils with weak load-bearing capacity is a regulation of air pressure in the tires of the driving wheels of multi-purpose wheeled vehicles. The paper describes the process of interaction of the wheel mover with the ground surface when the air pressure in the tire changes. The influence of air pressure on the traction properties of wheeled vehicles is established. The system of automatic control of air pressure in tires of mobile cars depending on road conditions is offered. The use of the proposed regulation principle will significantly increase the cross-country ability of multi-purpose wheeled vehicles in heavy traffic conditions, eliminating the subjective factor in the person of the vehicle operator.

Keywords: automatic regulation, tire, air pressure, propulsion, traction and coupling properties

For citation: Boikov V. P., Guskov V. V., Pavarekha A. S. (2021) Automated Tire Pressure Control System for Multi-Purpose Wheeled Vehicles. *Science and Technique*, 20 (1), 33–36. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-33-36>

Автоматизированная система регулирования давления воздуха в шинах многоцелевых колесных машин

Доктора техн. наук, профессора В. П. Бойков¹⁾, В. В. Гуськов¹⁾,
канд. техн. наук, доц. А. С. Поварехо¹⁾

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

Реферат. Проходимость многоцелевых колесных машин – одно из важнейших эксплуатационных свойств данных технических объектов. Во многом она определяется их тяговыми характеристиками. Известен ряд способов повышения тягово-сцепных свойств многоцелевых колесных машин, среди которых – применение различного рода противобуксовочных систем, блокировка межосевых и межколесных дифференциалов, использование балласта и ряд других. Один из способов повышения тягово-сцепных свойств и проходимости машин по грунтам со слабой несущей способностью, который получил развитие в последнее время, – это регулирование давления воздуха в шинах ведущих колес многоцелевых колесных машин. В статье приводится исследование процесса взаимодействия колесного движителя с грунтовой поверхностью при изменении давления воздуха в шине. Установлено влияние давления воздуха на тягово-сцепные свойства многоцелевых колесных машин. Предложена система автоматического регулирования давления воздуха в шинах мобильных машин в зависимости от дорожных условий. Использование предложенного принципа регулирования позволит существенно повысить проходимость многоцелевых колесных машин в тяжелых условиях движения, исключив субъективный фактор в лице оператора транспортного средства.

Ключевые слова: автоматическое регулирование, шина, давление воздуха, движитель, тягово-сцепные свойства

Для цитирования: Бойков, В. П. Автоматизированная система регулирования давления воздуха в шинах многоцелевых колесных машин / В. П. Бойков, В. В. Гуськов, А. С. Поварехо // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 1. С. 33–36. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-33-36>

Адрес для переписки

Бойков Владимир Петрович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-95-96
trak_atf@bntu.by

Address for correspondence

Boikov Vladimir P.
Belarusian National Technical University
12, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-95-96
trak_atf@bntu.by

Introduction

It is known that the air pressure in the tires of multi-purpose wheeled vehicles (MWV) determines the shape and size of the contact fingerprint and affects their traction and coupling qualities and patency on the supporting surface. This process is accompanied by slipping and a change in the strength of resistance to movement due to deformation of the soil. With a decrease in pressure, the supporting surface of the tire increases and the pressure of the propulsion on the ground surface decreases, which leads to an improvement in the traction and coupling properties and throughput of the MWV. This is especially evident when driving on soils with weak bearing capacity. On the contrary, the increase in pressure when MWV moves along artificial roads such as concrete, asphalt, stone or rolled dirt roads when a track is not formed improves the efficiency of the machine. Tire air pressure regulation is currently carried out manually by the driver when the car is moving in different road conditions. However, when the MWV moves on soils with weak bearing capacity, the driver does not always have time to catch the moment of decrease in the tangential traction force F_k with an increase in skidding epe, which leads to loss of patency or due to loss of adhesion of the mover to the supporting surface or landing on the bottom due to the increase in the track depth. Based on the results of an analysis of modern studies on soil mechanics when a dynamic load is applied to them, a set of dependencies is formed that determine the interaction of driven sprockets with the ground surface. The main ones are soil resistance to compression and shear when applying dynamic loads. As a method, a theoretical study of the traction and coupling properties and patency of wheel propulsions when driving on dirt surfaces has been adopted. The result of theoretical studies is the creation of an electronic device that monitors the moment of decrease in traction force or complete slipping and gives a signal to reduce air pressure in the tires, and, conversely, to increase pressure when the machine enters a solid supporting surface. Creation of a system for automatic regulation of air pressure in MWV tires depends on road conditions.

The process of interaction of the propulsion multi-purpose wheeled vehicles with a soil surface

To determine the favorable moment of turning on or off the air flow valve in the tire, it is necessary to determine the adhesion properties of the propulsion, slipping and track depth. These properties are determined, on the one hand, by the

system-forming parameters of the MWV, such as: machine weight, engine power, propulsion structure, etc. On the other hand, they depend on the physical and mechanical properties of the soil surface, such as: structure and mechanical composition, humidity, soil resistance to compression and shear [1–3].

The most appropriate real conditions are the dependencies proposed by V. V. Katsygin [4, 5], namely:

– normal soil compression stress σ is determined by the formula

$$\sigma = \sigma_0 \operatorname{th} \left(\frac{k}{\sigma_0} h \right),$$

where σ_0 – bearing capacity of the soil, N/m^2 ; k – coefficient of volumetric crushing of the soil, N/m^3 ; h – immersion depth of the stamp, m;

– shear stress τ arising from the deformation of the soil are determined by the expression

$$\tau = f_{sk} q_x \left(1 + \frac{f_p}{\operatorname{ch} \frac{\Delta}{k_\tau}} \right) \operatorname{th} \frac{\Delta}{k_\tau},$$

q_x – pressure of the wheel on the ground, N/m^2 ; f_{sk} – coefficient of sliding friction; f_p – rest friction coefficient; k_τ – soil deformation coefficient, m; Δ – shear strain, m.

A graphical representation of the dependence of soil compression stresses is shown in Fig. 1.

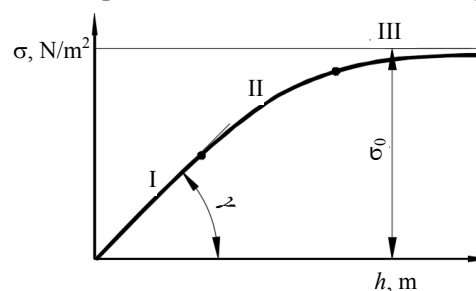


Fig. 1. Dependence of compression stresses on deformation ($k = \operatorname{tg} \gamma$)

Fig. 1 shows that there are three sections of this dependence: the first section reflects elastic deformation; the second is plastic; the third is the flow of soil.

A graphical representation of the dependence of shear stresses arising from soil deformation is shown in Fig. 2.

Figure 2 shows that the shear stresses reach a maximum at some strain Δ_0 , and then decrease. This phenomenon is explained by the fact that in section I the soil is compacted (static friction), and in section II it is shifted (sliding friction).

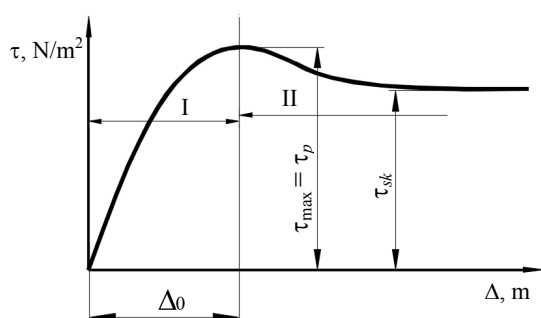


Fig. 2. The dependence of shear stress on deformation

Using these dependencies, prof. V. V. Guskov [6–8] developed a system of equations that describes the process of interaction between the driving and driven wheels of the propulsion device with a ground surface, and which allow to determine the traction and coupling properties and the permeability of MWV on soil surfaces. These equations are given below.

The force of resistance to movement F_{spr} due to the formation of a track with depth h

$$F_{spr} = \int_0^{h_0} b \sigma_0 \operatorname{th} \left[\frac{k}{4b\sigma_0} D_{pr} \ln \left(\frac{D_{pr} - h}{D_{pr} - h_0} \right) \right] dh, \quad (1)$$

where b – width of the wheel, m; $D_{pr} = 2r_{pr}$ – reduced wheel diameter, m; h_0 – soil deformation at the corresponding vertical load, m; σ_0 – soil bearing capacity, N/m²; k – coefficient of volumetric crushing of the soil, N/m³.

The vertical load leading to soil deformation by h_0

$$G = \int_0^{h_0} \frac{b \sigma_0 (D_{pr} - 2h)}{2\sqrt{D_{pr}h - h^2}} \operatorname{th} \left[\frac{k}{4b\sigma_0} D_{pr} \ln \left(\frac{D_{pr} - h}{D_{pr} - h_0} \right) \right] dh. \quad (2)$$

The reduced radius of the wheel can be determined by the expression

$$r_{pr} = \frac{h^2 + \left[2\sqrt{r_0 h_{sh}} - h_{sh}^2 + \sqrt{2r_0 h - h^2} \right]^2}{2h}. \quad (3)$$

In this expression, the value of tire deformation under load can be determined by the Heideckel formula

$$h_{sh} = \frac{G}{2\pi p_{sh} \sqrt{r_0 r_c}}, \quad (4)$$

where p_{sh} – tire pressure, Pa; r_c – radius of the tire section, which can be equated to half the width of the tire, m, those $r_c \approx b/2$.

The tangential traction force (driving force) is determined according to the formula

$$F_k = \int_0^{L_{pr}} b f_{sk} q_x \left(1 + \frac{f_p}{\operatorname{ch} \frac{\delta_x x}{k_\tau}} \right) \operatorname{th} \frac{\delta_x x}{k_\tau} dx, \quad (5)$$

where L_{pr} – reduced length of the supporting part of the wheel, m; q_x – mover pressure on the ground, N/m²; f_p, f_{sk} – coefficients of friction of rest and sliding; δ_x – slipping of the wheel at the point of contact with the x coordinate; k_τ – strain coefficient.

The reduced length of the wheel support is calculated as:

$$L_{pr} = r_0 \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{2r_0 h - h^2}{r_{pr} - h}} + \sqrt{2r_0 h}, \quad (6)$$

where h – rut depth, m.

A typical dependence obtained when calculating the expressions (1)–(6) of the tangential traction force F_k from slipping δ of the drive wheels is shown in Fig. 3.

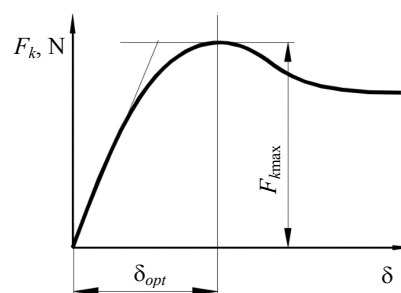


Fig. 3. The dependence of the tangential force on slipping when driving wheel on a dirt surface

Fig. 3 shows that the tangential traction force F_k increases depending on slipping δ to a certain value δ_{opt} , and then begins to decrease. This is due to the fact that when a tire with lugs interacts with the ground surface, the latter move the soil in the direction opposite to the movement of the machine and in the section from 0 to δ_{opt} , the driving force is proportional to the shear forces T_{sd} .

Upon reaching slipping δ_{opt} , the lugs cut off the soil “bricks” and an “earth” wheel is formed, i. e. shear friction T_{sd} is replaced by sliding friction T_{sk} . It is known that $T_{sd} \geq T_{sk}$ [9–11].

Thus, when slipping a wheel, there are two modes of slipping (Fig. 3):

- traction increases with increasing slip;
- the traction force drops and tends to a constant value, due to the friction forces of the “earth” wheel with a dirt surface.

Fig. 4 shows one of the options for the proposed system of automatic regulation of air pressure in the tires of mobile cars.

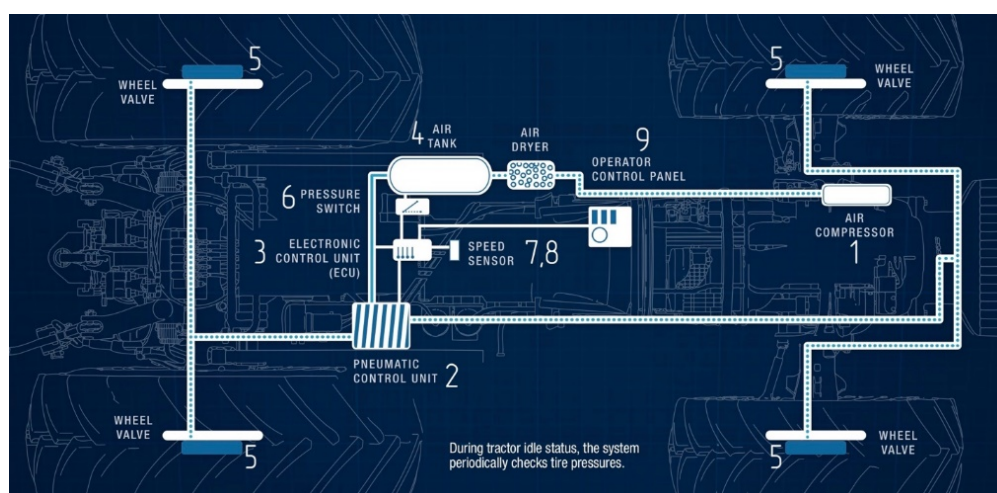


Fig. 4. Schematic diagram of an automatic system tire pressure regulation: 1 – compressor; 2 – pressure regulator; 3 – triple safety valve; 4 – receiver; 5 – tire valve; 6 – pressure sensor; 7 – real sensor speed; 8 – theoretical speed sensor; 9 – electronic unit

Air from the compressor 1 is supplied to the receiver 4, from which, using the bus valve 5, controlled by the electronic unit 9, directly to the bus. The air pressure in the tires is controlled by the electronic unit according to the signals from the real speed sensor 7, theoretical speed sensor 8 and torque sensors 6 by controlling the tire valves.

CONCLUSIONS

1. It is established that the regulation of air pressure in the tires of mobile cars affects their traction and coupling properties and patency.

2. Manual control has a number of disadvantages when moving the machine on various soil surfaces, when a rapid change in pressure is required.

3. It is possible to create a pressure control system that provides automatic tire pressure control depending on road conditions.

REFERENCES

1. Ageikin Ya. S. (1981) *Passability of Cars*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 232 (in Russian).
2. Becker M. G. (1973) *Introduction to the Theory of Terrain Wheeled Vehicles*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 519 (in Russian).
3. Babkov V. F., Birulya A. K., Sidenko V. M. (1959) *Passability of Wheeled Vehicles on the Ground*. Moscow, Avtotransizdat Publ. 189 (in Russian).
4. Katsygin V. V. (1964) *Some Issues of Soil Deformation. Questions of Agricultural Mechanics. Vol. XIII*. Minsk, Harvest Publ., 28–43 (in Russian).
5. Pokrovskii G. I. (1941) *Friction and Adhesion in Soils*. Moscow, Stroyizdat Publ. 170 (in Russian).
6. Guskov V. V. (1966) *The Optimal Parameters of Agricultural Tractors*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 195 (in Russian).
7. Boykov V. P., Guskov V. V., Zhdanovich Ch. I. (2017) *Multipurpose Tracked and Wheeled Vehicles. Design*. Minsk, Novoe Znanie Publ.; Moscow, INFRA-M Publ. 296 (in Russian).
8. Afanasyev B. A., Belousov B. N., Gladov G. I., Zheglov L. F., Zuzov V. N., Kotiev G. O., Polungyan A. A., Fominykh A. B. (2008) *Design of All-Wheel Drive Wheeled Vehicles. Vol. 1*. Moscow, Publishing House of MSTU, N. E. Bauman. 496 (in Russian).
9. Ksenevich I. P., Goberman V. A., Goberman L. A. (2003) *Ground Handling Systems. Encyclopedia: in 3 Volumes / under the Total*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 775 (in Russian).
10. Khachaturov A. A., Afanasyev V. L., Vasiliev V. S. (1976) *Dynamics of the Road – Bus – Car – Driver System*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 535 (in Russian).
11. Litvinov A. S., Farobin Y. E. (1989) *Car: Performance Theory*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 240 (in Russian).

Received: 08.10.2019

Accepted: 10.12.2019

Published online: 29.01.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-37-44>

UDC 621.3.051

Simulation Model for Drivability Assessment and Optimization of Hybrid Drive Trains

M. Domijanic¹⁾, M. Hirz¹⁾

¹⁾Graz University of Technology (Graz, Republic of Austria)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Abstract. The growing electrification of vehicle drive trains is increasing their complexity significantly. The interactions between the different drive train components should not be noticed negatively by the occupants, which is considered as good drivability and thus contributes to increasing customer acceptance. Today's development processes of hybrid- and electric driven cars consider energy management in earlier development phases as drivability optimization. In these early development phases, fuel- and energy consumption are optimized on the basis of standardized driving cycles. Drivability aspects and influences of real driving operation are not integrated until the prototype phase. In this way, modifications of drivability-relevant aspects phase are limited, which restricts the potential to find optimal solutions. In this context, the submitted paper presents an approach for assessment and optimization of the drivability of hybrid drive trains in the virtual development process. The created simulation model is exemplarily based on the P2-hybrid drive train of a VW Passat GTE. For the validation of the drive train model and the assessment of drivability, defined maneuvers were carried out on a test track and compared with the results of maneuver simulations. By simulating different driving maneuvers, the resulting acceleration oscillations, which affect the passenger, are calculated and evaluated from the aspect of drivability. The assessment method is derived from a VDI directive dealing with the effects of vibrations on the wellbeing and human health. In order to identify the influencing factors of different maneuvers and parameters of the drive train components, both were varied in the study. It turned out that change of gears and closing of the clutch had the greatest influence on the drivability and thus has the greatest potential for optimizing design and control strategy of hybrid drive trains. In this way, the presented approach enables the assessment and optimization of drivability of hybrid drive trains in the early development phase and thus reduces the gap between virtual development and prototype phase.

Keywords: hybrid drive train, drivability, development process, operating strategy, vehicle simulation

For citation: Domijanic M., Hirz M. (2021) Simulation Model for Drivability Assessment and Optimization of Hybrid Drive Trains. *Science and Technique*. 20 (1), 37–44. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-37-44>

Имитационная модель для оценки управляемости автомобилем и оптимизация гибридной силовой установки

Инж. М. Домиянич¹⁾, канд. техн. наук, доц. М. Хирц¹⁾

¹⁾Грацский технический университет (Грац, Австрийская Республика)

Реферат. Растущая электрификация силовых установок автомобилей существенно повышает их сложность. Совместная работа различных компонентов трансмиссии не должна быть замечена водителями и пассажирами, что рассматривается как хорошая управляемость и таким образом способствует росту удовлетворения требований потребителя. В настоящее время процесс разработки автомобилей с гибридным и электрическим приводом предполагает, что управление энергопотреблением – это элемент оптимизации управляемости транспортного средства. На ранних этапах разработки потребление топлива и энергии можно совершенствовать с помощью стандартизированных циклов

Адрес для переписки

Домиянич Марко
Грацский технический университет
ул. Инфельдгассе, 11/2,
8010, г. Грац, Австрийская Республика
Тел.: +43 316 873-352-55
domijanic@tugraz.at

Address for correspondence

Domijanic Marko
Graz University of Technology
11/2, Inffeldgasse str.,
8010, Graz, Republic of Austria
Tel.: +43 316 873-352-55
domijanic@tugraz.at

вождения. Аспекты управляемости и влияние реального процесса вождения не рассматриваются вплоть до этапа разработки и испытаний опытного образца. Таким образом, варианты аспектов, имеющих отношение к управляемости, весьма ограничены, что снижает потенциал для принятия оптимальных решений. Исходя из этого в данной статье представлен подход к оценке и оптимизации управляемости гибридных приводов с помощью виртуальной разработки. В качестве примера создана имитационная модель, основанная на P2-гибридной трансмиссии VW Passat GTE. С целью оценки правильности модели трансмиссии и управляемости проведены определенные мероприятия на испытательном полигоне, которые затем сравнивались с результатами моделированных маневров. Моделируя различные маневры вождения, результирующие колебания ускорения, влияющие на пассажира, рассчитываются и оцениваются с точки зрения управляемости. Метод оценки основывается на рекомендациях Ассоциации немецких инженеров (VDI), учитывающих влияние вибраций на здоровье человека. Для выявления определяющих факторов при изучении разных маневров и параметров компонентов трансмиссии в исследованиях анализировались и маневры, и параметры. Определено, что смена передач и включение сцепления оказывают максимальное влияние на ходовые характеристики транспортного средства и поэтому обладают наивысшим потенциалом для проведения оптимизации конструкции и стратегии управления гибридными трансмиссиями. Таким образом, предлагаемый подход позволяет оценить и оптимизировать управляемость гибридных приводов на ранней стадии разработки. Тем самым сокращается период времени между виртуальной разработкой и этапом создания прототипа.

Ключевые слова: гибридная силовая установка, управляемость, процесс разработки, стратегия эксплуатации, моделирование транспортного средства

Для цитирования: Домиянич, М. Имитационная модель для оценки управляемости автомобилем и оптимизация гибридной силовой установки / М. Домиянич, М. Хирц // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 1. С. 37–44. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-37-44>

Introduction

Due to the increasing electrification of vehicle drive trains, their control complexity increases significantly. For instance, the drive train of a hybrid-electric vehicle is considerably more complex in comparison to a vehicle driven only by an Internal Combustion Engine (ICE). However, the complex algorithms for drive train control, which influence the dynamics vehicle behavior, should not be perceived by the passengers, which is then regarded as good drivability or driving comfort.

The development and optimization of the operating strategy is an essential factor in achieving optimum energy- respectively fuel consumption. A range-optimized operating strategy depends on various external factors, such as route profile, driving style and drivability. State-of-the-art in

vehicle development processes of electrified vehicles (xEVs) is to consider energy management decoupled from drivability (Fig. 1).

In the early development phase, energy management is developed and optimized on the basis of standardized driving cycles (e. g. NEDC, WLTP). Drivability aspects as well as influences of real driving operation are not integrated until the prototype phase [1]. In this early development phases, the operating strategy of xEVs is often designed purely for optimum fuel-, respectively energy consumption. Later in the development process, prototypes are used to investigate the impact of the operating strategy on drivability. The possibilities for modifications in these later development phases are limited and an optimal solution is in most cases no longer possible [2].

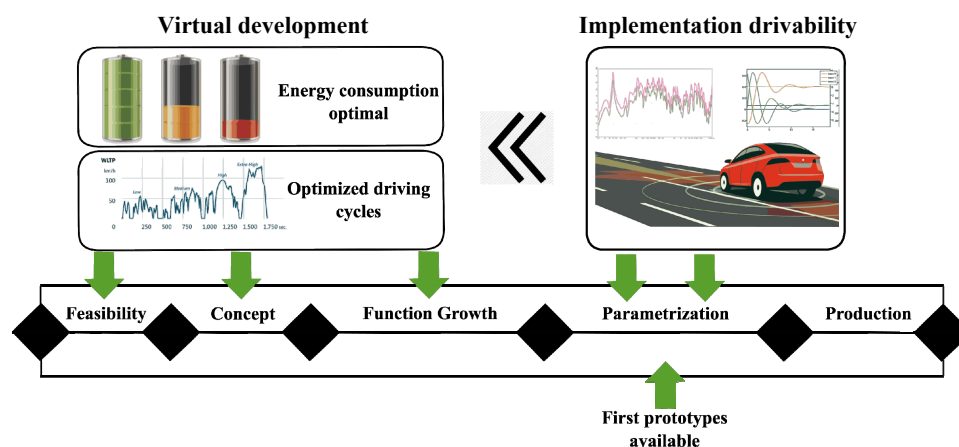


Fig. 1. State-of-the-art vehicle development process [1]

In this publication, an approach is presented for assessment and optimization of drivability (comfort and performance) of hybrid drive trains within the virtual development process. With the presented methods the gap in the development process between virtual concept and prototype-based development shall be closed.

In the first step, specific driving maneuvers for the objective assessment of drivability were defined. For the measurements and modelling of an exemplary hybrid drive train, a P2-hybrid drive train configuration of a VW Passat GTE [3] was selected. In order to validate the developed simulation model, comprehensive measurements were carried out on public roads and on a test track. The simulation model was then validated and parameterized on the basis of the generated measurement data. Subsequently, parameters of drive train components were varied to understand their influence and optimization potential on drivability.

Drivability assessment. Drivability is generally defined as the impact of various vehicle characteristics on the driver and/or passengers. This includes vehicle dynamics, e. g. response behavior, shifting behavior and load-change behavior [4].

The terms driving comfort and drivability are often used in a similar context. Nevertheless, driving comfort is defined as the absence of discomfort [5]. The determination of driving comfort is based on a subjective evaluation, i. e. different drivers experience comfort differently. Drivability, on the other hand, is based on an objective assessment process, which is evaluated by characteristic parameters such as vehicle acceleration, response, etc. [6]. Fig. 2 shows the main influencing factors on driving comfort [6].

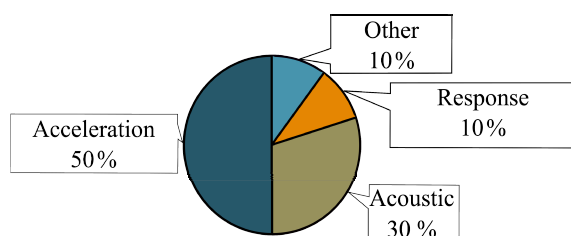


Fig. 2. Main factors influencing driving comfort [6]

The drive train, consisting of engine(s), gear-box(es), traction components, wheels, etc., has a particular influence on drivability [5]. The acceleration

and oscillations caused by the drive train affect the driver (normally seated) at different locations and with different intensity. In general, drivability is assessed as subjective perception, making it technically difficult to measure. The subjective assessments are usually carried out by trained personnel or by test persons. For the subjective assessment of drivability, a grading scale has been established in which grades from 1 to 10 are awarded for specific occurrences.

Due to the subjective character of such assessment systems, attempts are made to find objective measurement methods for assessing driving comfort. Accelerations of the vehicle are transferred by the chassis to the driver's seat, where the driver perceives these accelerations mainly via the backrest.

The assessment and effect of acceleration vibrations on humans are comprehensively described in the VDI Guideline 2057 Sheet 1 [7] as the basic guideline for whole-body vibrations. In this guideline, whole-body vibrations are defined as vibrations in the frequency range from 0.1 Hz to 80 Hz. Experiments have shown that the relevant frequency range for the determination of effects on humans is between 0.1 Hz and 30 Hz [6]. In general, the VDI 2057-1 standard defines a calculated driving comfort index or vibration comfort value which is compared with a subjective table in order to determine the subjectively experienced ride. Tab. 1 shows the relationship between the calculated comfort value and the subjective perception according to the VDI 2057-1 guideline.

Table 1
Relationship between calculated comfort value and the subjective perception [7]

Vibration total value, m/s^2	Description of perception
<0.010	Not noticeable
0.015	Perception threshold
0.020	Just noticeable
0.080	Noticeable
0.315	Strongly noticeable
>0.315	Very strongly noticeable

Several OEMs (Original Equipment Manufacturers) and suppliers have developed their own

methods for the objective assessment of drivability. Audi, for instance, uses the Ride meter tool to assess the chassis regarding vibration comfort [8]. A commercial available assessment tool for drivability was introduced in 1998 by AVL List GmbH under the name AVL-DRIVE™ [9]. The AVL-DRIVE™ system makes it even in the prototype phase of vehicle development possible to assess how the vehicle reacts to the driver and vice versa, how the driver perceives the driving experience.

In order to objectively assess drivability, maneuvers are necessary that represent the main driving situations for comfort and performance assessment. For that reason, maneuver plans have been developed and assigned to the categories: acceleration maneuvers, drive away, constant speed, gear shifts, *Tip-In* and *Tip-Out*. In addition, objective drivability criteria and the associated measurable parameters were defined. Tab. 2 shows pre-defined driving maneuvers according to [10].

Table 2

**Maneuver plans and objective criteria
for drivability assessment [10]**

Maneuver	Sub maneuver	Criteria
Acceleration	Full load 0–100 km/h	Response
	Elasticity	Acceleration gradient
Const. speed	Idle driving	Speed fluctuations
	Part load	Vibrations
Drive away	Hill start	Acceleration peak
	Normal start	Initial bump
Tip-In	After constant speed	Jerks
	Short Tip-In	Response delay
Tip-Out	After acceleration	Jerks
	After constant speed	Initial bump
Gear shift	Downshift during braking	Shift duration
	Downshift after kick down	Shift delay

Drive train modelling and validation

Parameter determination. In order to provide accurate statements regarding drivability within a virtual (simulation-) environment, it is necessary to parameterize the vehicle model as exactly as possible. For this reason, comprehensive measurements were carried out with the reference vehicle.

Due to the complex P2-hybrid architecture of the drive train, high effort was required for parameter determination.

For the pitching model, which is required to simulate vehicle movements in the longitudinal direction, spring and damper parameters were experimentally determined and the chassis characteristics were parameterized according to [11]. For a proper re-production of brake maneuvers, the relationships between brake pressure and brake force on the front and rear wheels were analyzed. The validation of the measurement approach was carried out by simulating the braking maneuvers listed in Tab. 2 with a longitudinal dynamic vehicle model. In addition, the position and height of the center of gravity was determined by measurement.

The analysis of various driving cycles has shown that the drive train operating strategy of the reference vehicle includes a high number of switch-off and switch-on sequences as well as combined operating states of the two traction motors (electric motor and combustion engine). With the available measurement equipment, it was not possible to record the various operating states of the drive train with sufficient accuracy. For this reason, the operating strategy of the hybrid vehicle could not be described and examined in greater detail. Nevertheless, it was possible to record relevant dynamics data of the vehicle reaction with sufficient accuracy for performing the drivability assessment in the required precision.

Drive train modelling. The simulation model was developed to reproduce the following vehicle behavior: longitudinal dynamics for performance evaluation; combined vertical and longitudinal dynamics for comfort evaluation. In the first step, an existing model of a P2-hybrid drive train in the simulation environment LMS AMESim [12] was adapted to the drive train of the reference vehicle and parameterized with data acquired from measurements.

Fig. 3 shows the developed drive train model containing the following components: driver model, internal combustion engine model, electric motor/generator model, transmission model, clutch model, battery model, vehicle model and hybrid operating strategy. The modelled P2-hybrid drive train consists of components, which interact with each other and can reproduce real driving behavior with sufficient accuracy.

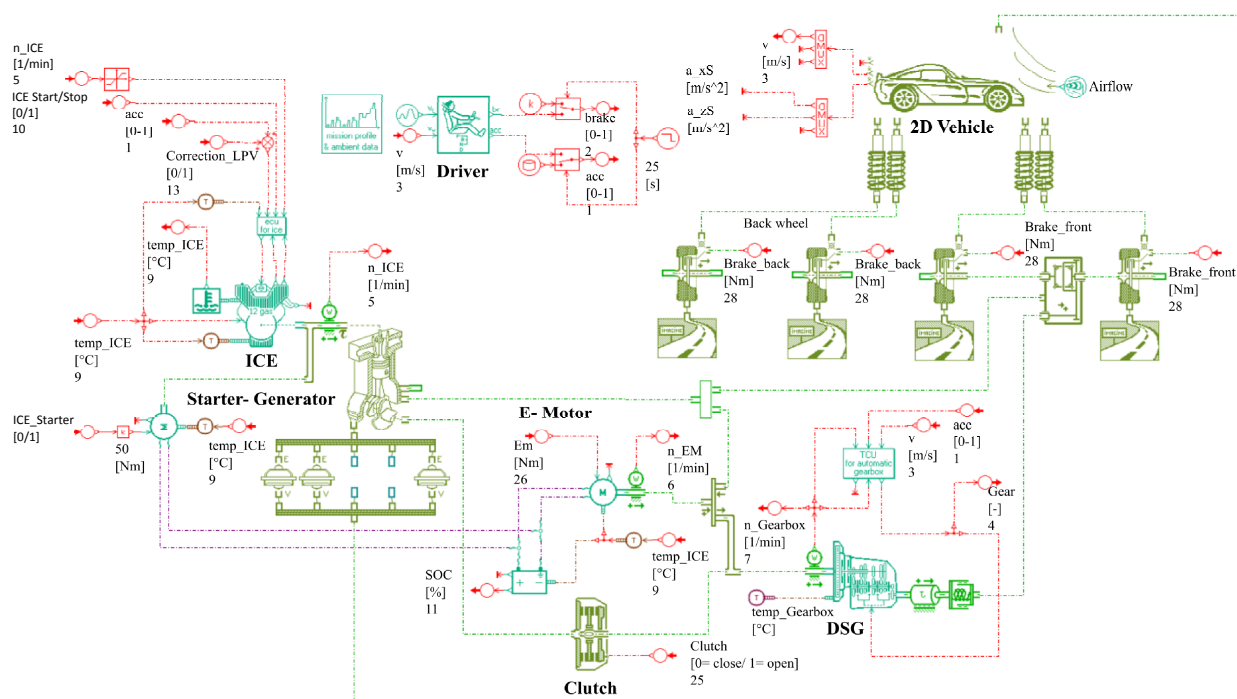


Fig. 3. P2-hybrid drive train model of VW Passat GTE [13]

Validation of the simulation model. In order to verify whether the modelled drive train demonstrates a behavior that correlates with a real vehicle, driving maneuvers were simulated in the simulation model and compared with measurement data collected during pre-defined driving maneuvers performed with a corresponding car.

Firstly, all drivability-relevant maneuvers listed in Tab. 2 were carried out on public roads and on a test track. For the measurements, the CAN-Bus (Controller Area Network) of the reference vehicle

was recorded and the inertial measurement technology ADMA (Automotive Dynamic Motion Analyzer) [14] was used. The data was recorded using a Dewetron [15] measurement computer.

As input torque for the simulations, the delivered information about the system torque output, recorded during the test drives, was used, which represents the combined driving torque provided by both electric motor and ICE. Subsequently, the behavior of the modelled drive train was analyzed in comparison to the experimental results.

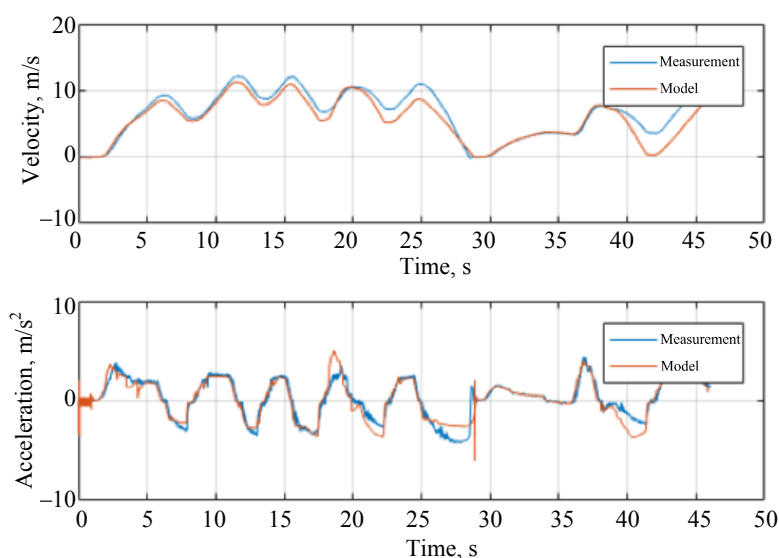


Fig. 4. Validated maneuvers – normal start, creep, rolling stop, vehicle stop [16]

Fig. 4 shows the validated maneuvers – normal start, creep, rolling stop, vehicle stop as a comparison of measured and simulated vehicle speed and acceleration. The (small) discrepancies between measurement and simulation velocity shown in Fig. 4 are primarily due to uncertainties in modeling of the brake system. Due to the fact, that the present research focusses on the propulsion system, the influence of the brake on the drivability can be neglected.

Virtual drivability assessment

Based on the simulation model, virtual drivability assessment of the conducted driving maneuvers was carried out. Considered were driving maneuvers listed in Tab. 2, where by the simulation was performed in several variations. The drivability assessment of the simulation model was carried out with the evaluation method according to VDI 2057-1.

In the first step, throttle pedal position, velocity and SoC (State of Charge) of the battery were changed in order to recognize possible influence of the execution of a driving maneuver on drivability relevant aspects.

Following, a *Tip-In* maneuver is exemplary analyzed. The *Tip-In* maneuver was carried out with variation of the initial velocity. This maneuver was conducted at 30, 50, 70, 100 and 130 km/h. In this scenario, the throttle pedal was pressed fully at a rate of 100 % per second. The resulting accelerations at the seat rail for the *Tip-In* at 30 km/h maneuver (starts at 35 s) are shown in Fig. 5.

At higher velocities, the accelerations look similar, but occur in an extended form. This is due to

the greater acceleration potential of the vehicle at 30 km/h compared to higher speeds. The full actuation of the pedal therefore produces the highest accelerations. At approximately 37.2 s, a further increase in acceleration can be seen, which can be explained by the activation of the *Boosting* function. The calculated comfort values (Tab. 1) of the five velocity variants are 1.798 for the *Tip-In* at 30 km/h, 1.344 at 50 km/h, 0.916 at 70 km/h, 0.707 at 100 km/h and 0.325 at 130 km/h. All of the occurring oscillations in the drive train are therefore very strongly noticeable. However, it can be seen that as the velocity increases also the driving comfort increases, which is due to the lower gear ratios at higher gears. As has already been the case in other maneuvers, gear shifts at low gears cause higher oscillations and must therefore be considered as an influencing factor for *Tip-In* maneuvers.

Other analyzed maneuvers were full-throttle acceleration from 0 km/h to 100 km/h, normal start, downshifting during braking, upshifting during part load acceleration and *Tip-Out* after constant speed. By simulating and assessing the various driving maneuvers, occurrences that are responsible for the oscillations in the drive train were detected. It turned out that gear changes at high gear ratios produce high acceleration amplitudes in the driver's seat rail and thus are crucial for the assessment of drivability. The transition between hybrid and electric driving was also a trigger for peaks in the acceleration signal. In general, change of gears and closing of the clutch had the greatest influence on the drivability and thus the highest optimization potential for the hybrid drive train in the virtual development phase.

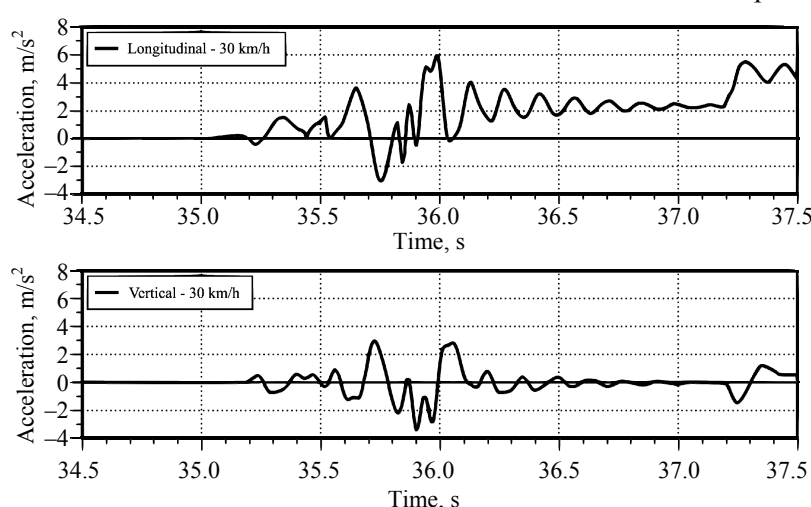


Fig. 5. Occurring accelerations at the seat rail during a *Tip-In* maneuver, starting at 30 km/h

Parameter variation of drive train components. In order to find out how the drivability in the tested driving scenarios can be improved, the parameters of selected drive train components of the simulation model were varied and the effects on the driving maneuvers were analyzed.

The effects were assessed on the basis of the driving maneuvers full-throttle acceleration from 0 km/h to 100 km/h (both gear changes and hybrid operation occurred), *Tip-In* at constant speed at 50 km/h (gear changes occurred and *Boost* was active) and a *Tip-Out* after a constant speed at 130 km/h.

Following, an exemplary parameter variation of the clutch model is analyzed. In the clutch model, stiffness and damping coefficient of the torsional damper were varied, which is responsible that oscillation peaks of the ICE do not cause damage to the gearbox and ensure a smooth clutch engagement. The comfort values of the parameter variation for the three driving maneuvers are listed in Tab. 3.

Table 3

Comfort values for parameter variation
of the clutch model

Parameter	Value	Comfort value		
		Full-throttle acceleration	<i>Tip-In</i>	<i>Tip-Out</i>
Clutch stiffness, Nm/rad	500	1.202	1.438	0.143
	600	1.204	1.402	0.143
	700	1.206	1.371	0.143
	800	1.206	1.344	0.143
	900	1.209	1.323	0.143
	1000	1.215	1.307	0.143
	1100	1.218	1.294	0.143
Clutch damping, Nm·s/rad	0	1.235	1.369	0.143
	0.5	1.203	1.355	0.143
	1.0	1.199	1.344	0.143
	1.5	1.199	1.335	0.143
	2.0	1.198	1.328	0.143
	2.5	1.198	1.323	0.143
	2.0	1.198	1.321	0.143

It can be observed that the comfort value at full throttle acceleration increases (drivability decreases) proportional to the stiffness of the torsional damper, while during the *Tip-In* this tendency is opposite. During *Tip-Out* no change is detected.

Overall, drivability improves with increasing stiffness of the torsional damper during the simulated driving maneuvers. The variation of the damping coefficient shows similar results. With increasing damping, the comfort value decreases and thus drivability is improved.

Similarly, longer shifting times of the gearbox model increase the drivability. Although the driving comfort is increased in this case, the performance suffered and the acceleration from 0 to 100 km/h requires more time. Increasing the stiffness of the drive shafts does not lead to the same effect as with the clutch. The comfort values increase in this case, but it should be noted that a minimum rigidity must be obtained when designing the shafts in order to transmit the full torque of the drive units to the wheels. For the wheel suspension no clear tendency of the comfort values can be recognized with variation of the spring stiffness. However, there is a range, in which the drivability is optimal. A stronger damping results in an overall improvement.

CONCLUSIONS

1. In this work, an approach is presented for the assessment and optimization of drivability of hybrid drive trains in virtual development processes. In the first step, various maneuvers for the drivability assessment were defined, which cover relevant driving situations for the comfort and performance assessment. Furthermore, objective drivability criteria and the corresponding measurable parameters were defined.

2. In the next step, the P2-hybrid drive train of a reference vehicle was modelled and parameterized with data acquired by measurements. In order to validate the model, comprehensive measurements were carried out on public roads and on a test track. The simulation model was then validated on the basis of the generated measurement data. Occurring differences between measurement and simulation at braking maneuvers were identified due to insufficient modelling of the brake. But if maneuvers without braking are to be analyzed, which is the case for most of the defined maneuvers, this model provides very good results. For a more precise representation of the drive train, it is necessary to have all data available, e. g. engine

characteristics, efficiencies, positions and stiffnesses of engine bearings, maximum transmittable torque of clutches, rules of the hybrid operating strategy, etc.

3. By simulating different driving maneuvers, the resulting acceleration oscillations were calculated according to the VDI 2057-1 method and evaluated from the aspect of drivability. It turned out that gear changes at high gear ratios produce high acceleration amplitudes in the driver's seat rail and thus play a decisive role in the drivability assessment. The transition between hybrid and electric driving was also a trigger for peaks in the acceleration signal.

4. In order to identify the influencing factors of different maneuvers and parameters of the drive train components, both were varied. For instance, stiffer variants of the torsional damper of the clutch with higher damping and longer shifting times of the gearbox model improved drivability. Although the driving comfort was increased, the performance was affected and an acceleration from zero to 100 km/h required more time. The simulation of driving maneuvers with optimized drivetrain setup often resulted in high comfort values, suggesting that there is potential for optimization of driving comfort.

5. Overall, change of gears and closing of the clutch had the greatest influence on the drivability and thus has the highest potential for optimizing the hybrid drive train. In this way, the introduced approach enables an assessment and optimization of drivability within a simulation environment and thus supports the development process of hybrid drive trains even in early project phases.

REFERENCES

1. Institute of Automotive Engineering, Graz University of Technology (2016–2018) *KoMoT – Comfortable Mobility by Technology Integration*. Available at: <https://trimis.ec.europa.eu/project/comfortable-mobility-through-technology-integration>.
2. Gerson S., Matthies F., Jaensch D. *Drivability Analysis of Tomorrow's Drive Trains in Real Road Traffic*. IAV GmbH, Berlin.
3. *Specification of VW Passat GTE*. Available at: <https://www.volkswagen.at/service-zubehoer/vorgaengermodelle/passat-gte>. (Accessed September 2019) (in German).
4. Fischer R., Kückay F., Jürgens G. et al. (2012) *Das Getriebebuch*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0877-2> (in German).
5. Albrecht M. (2005) *Modelling of Comfort Ratings from a Customer's Point of View on the Example of the Automated Start-Up Procedure*. Dissertation, University Karlsruhe (in German).
6. Matthies F. (2013) *Contribution to the Modeling of Powertrains for Drivability Studies*. Dissertation, Technical University of Berlin (in German).
7. The Association of German Engineers (2002) *Human Exposure to Mechanical Vibrations – Whole-Body Vibration*.
8. Glaser H., Renner M. (2002) *The Chassis of the Audi A8*. ATZ.
9. List H., Schöggel P. (1998) *Objective Evaluation of Vehicle Drivability*. SAE Technical Paper No 980204. <https://doi.org/10.4271/980204>.
10. AVL List GmbH (2008) *AVL-DRIVE the Objective Tool for Drivability Assessment & Development*.
11. Rill G. (2008) *Comparison of Integration Methods on an Example from Vehicle Dynamics*. University of Regensburg (in German).
12. *Siemens PLM Software – Simcenter Amesim*. Available at: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/de/products/simcenter/simcenter-amesim.html>. (Accessed September 2019).
13. Domijan M., Hirz M. (2019) Simulation Models for the Assessment of the Influence of Driver Behavior on the Control of xEV Drive Trains. *International Vienna Motor Symposium* (in German).
14. *Automotive Dynamic Motion Analyzer (ADMA)*. Available at: <https://www.genesys-offenburg.de/en/products/adma-speed-and-braking-distance-sensor/>. (Accessed September 2019).
15. *Dewetron Measurement Computer*. Available at: <https://www.dewetron.com/products/data-acquisition-hardware-chassis/>. (Accessed September 2019).
16. Domijan M. (2018) *Influence of Driver Behavior on the Efficiency-Optimal Control of xEV Drive Trains*. Report, Institute of Automotive Engineering, Graz University of Technology (in German).

Received: 08.10.2019

Accepted: 10.12.2019

Published online: 29.01.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-45-51>

UDC 656.13.08

Ways to Improve Road Safety Audit in the Republic of Kazakhstan

K. Ibrayev¹⁾, D. Kapskiy²⁾, S. Bogdanovich³⁾

¹⁾GOLD PRODUCTS LLP (Nur-Sultan, Republic of Kazakhstan),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

³⁾Belarusian Road Scientific-Research Institute “BeldorNII” (Minsk, Republic of Belarus)

© Белорусский национальный технический университет, 2021

Belarusian National Technical University, 2021

Abstract. There are two types of internationally recognized engineering approaches to addressing road safety issues – proactive and reactive. Predicted or proactive approach includes prevention of accidents and taking corrective measures before accidents can occur. One example of this approach is road safety audit, which is a relatively new tool in developing countries. The paper has analyzed approaches to road safety audit outlined in guidelines of the United Kingdom, Ireland, USA, Australia, Canada, as well as in guidelines of Asian Development Bank for the countries of Central Asian Regional Economic Cooperation. All reviewed documents are characterized by a similar approach to the basic definitions, to selection of audit team and requirements for team members, to the main stages of road safety audit. All reviewed guidelines emphasize that audit is not a means of project works evaluation, verification of compliance with standards, a means of projects ranking or evaluation. Approach to road safety audit, outlined in recommendations developed in the Republic of Kazakhstan has also been analyzed. It has been established that the document does not meet approaches adopted in developed countries. Conditions of the Republic of Kazakhstan require development of a new document based on analysis of the best international experience. Currently, the Republic of Kazakhstan has embarked on a gradual introduction of “road forgiving mistakes” approach to the design and operation of roads. This fact should also be considered when revising road safety audit manual.

Keywords: road safety, road safety audit, Republic of Kazakhstan, goals of road safety audit, audit methodology

For citation: Ibrayev K., Kapskiy D., Bogdanovich S. (2021) Ways to Improve Road Safety Audit in the Republic of Kazakhstan. *Science and Technique*, 20 (1), 45–51. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-45-51>

Пути повышения качества аудита безопасности дорожного движения в Республике Казахстан

Асп. К. Ибраев¹⁾, докт. техн. наук, доц. Д. Капский²⁾, канд. техн. наук, доц. С. Богданович³⁾

¹⁾Компания «Голд Продактс» (Нур-Султан, Республика Казахстан),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

³⁾Белорусский дорожный научно-исследовательский институт «БелдорНИИ» (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Существуют два типа международно признанных инженерных подходов к решению проблем безопасности дорожного движения – упреждающий и реактивный. Прогнозируемый, или упреждающий, подход включает предотвращение аварий и принятие корректирующих мер до того, как они могут произойти. Одним из примеров такого подхода является аудит безопасности дорожного движения. Это относительно новый инструмент в развивающихся странах. В статье проанализированы подходы к аудиту безопасности дорожного движения, изложенные в руководствах Великобритании, Ирландии, США, Австралии, Канады, а также в рекомендациях Азиатского банка развития для

Адрес для переписки

Ибраев Кензат
Компания «Голд Продактс»
ул. Туркестан, 30/224,
010000, г. Нур-Султан, Республика Казахстан
Тел.: +7 701 614-42-40
goldproducts.kz@gmail.com

Address for correspondence

Ibrayev Kenzat
GOLD PRODUCTS LLP
30/224, Turkistan str.,
010000, Nur-Sultan, Republic of Kazakhstan
Tel.: +7 701 614-42-40
goldproducts.kz@gmail.com

стран Центральноазиатского регионального экономического сотрудничества. Для всех рассмотренных документов характерен схожий подход к основным определениям, выбору аудиторской группы и требованиям к ее членам, основным этапам аудита безопасности дорожного движения. Во всех рассмотренных руководствах подчеркивается, что аудит – это не средство оценки работ по проекту, проверки соответствия стандартам, средство ранжирования или оценки проектов. Также был проанализирован подход к аудиту безопасности дорожного движения, изложенный в рекомендациях, разработанных в Республике Казахстан. Установлено, что документ не соответствует подходам, принятым в развитых странах. Условия Республики Казахстан требуют разработки нового документа, основанного на анализе лучшего международного опыта. В настоящее время Республика Казахстан приступила к постепенному внедрению концепции «прощающей ошибки дороги» в проектировании и эксплуатации дорог. Этот факт также следует учитывать при пересмотре руководства по аудиту безопасности дорожного движения.

Ключевые слова: безопасность дорожного движения, аудит безопасности дорожного движения, Республика Казахстан, цели аудита безопасности дорожного движения, методология аудита

Для цитирования: Ибраев, К. Пути повышения качества аудита безопасности дорожного движения в Республике Казахстан / К. Ибраев, Д. Капский, С. Богданович // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 1. С. 45–51. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-45-51>

Introduction

Currently, the role of traffic management quality improvement has increased. Works to improve road safety require further improvement in order to reduce total socio-economic losses in road traffic.

In all documents, developed and under development, such as Plan of Priority Actions for Road Safety increase in the Republic of Kazakhstan for 2017–2020, developed with support of Asian Development Bank, “National Concept for Road Safety” project, developed by Interdepartmental Research Institute, Academy of Law Enforcement Agencies under the General Prosecutor's Office of the Republic of Kazakhstan, as well as by other international financial institutions: World Bank, EBRD, as well as TRACECA, it is noted that at present there is a gap in regulatory and technical base in the field of road safety in terms of taking into account interconnection of elements affecting road safety: people, road infrastructure and transport, as well as absence of such a preventive tool in this system as a road safety audit.

As international experience shows, remaining within the framework of engineering activity traditional for the Republic of Kazakhstan, which reduces mainly to maintenance of a considerable length of roads, it will be difficult to significantly improve traffic safety. Based on the analysis of the world practice of road safety provision, the country should begin work on introduction of modern technologies and methods of work organization in this direction. This primarily relates to road safety audits.

Road safety is a global socio-economic issue. In developing countries, the number of victims and fatalities in road traffic accidents is growing at an alarming rate. From economic point of view, the cost of road traffic accidents is estimated at about one percent (1.0 %) of gross national product in low-income countries, one and a half percent (1.5 %) in middle-income countries, and two percent (2.0 %) in high-income countries [1]. According to the World Health Organization [2], road traffic injuries will take third place in 2020 among all causes in terms of losing a year of life, considering possible disability, compared with the ninth place in 1990. Road Safety Manual indicates that thirty-four percent (34.0 %) of all accidents occurred partially or completely due to road traffic factors [3].

There are two types of internationally recognized engineering approaches to addressing road safety issues – proactive and reactive. In the case of reactive approach, measures to improve safety are taken after the accident has already occurred. In many developing countries, use of reactive approach does not bring significant success due to the lack of regulatory requirements necessary to use this approach [4]. Predicted or proactive approach includes prevention of accidents and taking corrective measures before accidents can occur. One example of this approach is road safety audit (RSA, Road safety audit), which is a relatively new tool in developing countries. In essence, audit is an accident prevention tool. Studies that have attempted to quantify the benefits of audit have produced impressive results. In the UK, road administration estimated benefit-cost ratio for RSA

to be 15:1, in New Zealand this ratio is estimated to be 20:1. Cost-benefit analysis in Denmark that passed safety audit showed an average profit margin of 146 percent in the first year [5].

The first road safety audits were carried out in the UK in the 1980s, and in Australia and New Zealand in the early 90s. However, until 1996, audits in many developed countries, including the USA, were not conducted. During the 1990s, audit was introduced in other countries such as Denmark, Canada, the Netherlands, Germany, Switzerland, Sweden and South Africa. Subsequently, RSA was actively introduced in developing countries such as Malaysia, Singapore, Bangladesh, India, Mozambique and the United Arab Emirates. Currently, the World Bank and the European Council for Transportation Safety are actively promoting their national road safety programs [6]. In a number of countries, RSAs are practiced in accordance with the guidelines of individual countries (their own guidelines). As early as 2008, the European Union adopted mandatory Directive 2008/96/EC "Road Infrastructure Safety Management" (hereinafter the "Directive"). The directive became law on November 19, 2008 and entered into force on December 19, 2010. The document introduced requirements and obliged the EU member states to introduce and carry out the following activities on the roads included in the network of trans-European transport corridors [7]:

- road safety audit;
- certification of road safety auditors;
- assessment of the impact on road safety of road construction and repair projects;
- traffic safety inspection;
- road network safety rating;
- informing the public about accident centers.

Actions of EU countries to implement the Directive have allowed member countries to achieve notable success in reduction of the accident rate. In 2010–2016, the number of deaths due to road accidents in the EU countries decreased by 19 %. In 2016, 25620 people died on EU roads, which is 510 less than in 2015 and 5900 less than in 2010. The total number of deaths per 10 thou-

sand cars in all EU countries is 0.88. For comparison: in the Republic of Belarus this indicator is 1.48 people, and in the Republic of Kazakhstan – 4.6 people [8].

In recent years, deaths due to road accidents in the EU countries have remained at approximately the same level. In response to this slowdown, revision of the Directive and adoption of a new version, which will be significantly expanded, are currently being prepared.

Currently, road safety audits are already used very widely: in all EU countries, the USA, Canada, Australia, New Zealand, and many developing countries. Normative documents on audit conduction in the Republic of Kazakhstan [9], Russia [10], Belarus [11] were developed and put into effect.

The purpose of this study is to compare guidelines for road safety audits in selected developed countries, with the goal of improving approaches to road safety in the Republic of Kazakhstan.

Approaches to road safety audit in developed countries

In modern conditions of globalization and development of information technology, obtaining information has been greatly simplified. When developing or substantially revising a normative-technical document, studying experience of other countries is not only desirable, but also necessary. This avoids potential errors and reduces costs. Moreover, it is important to use as samples such documents that, firstly, do not have theoretical errors, and secondly, have a positive experience in their use. We reviewed approaches to road safety audit in some developed countries.

The review included road safety audit guidelines used in the UK [12], Ireland [13], the USA [6, 14], Australia [15], Canada [16], as well as Asian Development Bank guidelines for countries of Central Asian Regional Economic Cooperation (CAREC) [17].

All of these documents are available for review on the Internet. The first factor considered was definition of road safety audit. The results are shown in Tab. 1.

Table 1

Definition of audit in the reviewed documents

Country	Definition
United Kingdom	Road safety audit is an independent and formal assessment of road project during design and at the end of construction (preferably before the road is open for traffic)
Ireland	Road safety audit is an assessment of the road during design and construction before the road is put into operation, to identify potential safety hazards that can affect any road user, to propose measures to eliminate or mitigate these problems
USA	Road safety audit is a formal safety audit of an existing or future road or intersection by an independent audit team. RSA team considers safety of all road users, qualitatively evaluates and reports on road safety problems and opportunities for improving safety
Australia	Road safety audit is an official audit of a future road project or traffic organization or existing road, during which an independent qualified team reports on potential project problems that affect safety performance. Road safety audit process addresses safety of all road users
Canada	Road safety audit is a formal and independent audit of road project effectiveness, carried out by experienced team of safety experts and covering safety issues for all road users
Asian Development Bank	Road safety audit is a formal and detailed study of a road project by independent and competent group of auditors, the result of which is a report with a list of potential safety problems in the project

The essential points that distinguish most definitions, are that audit:

- is a formal procedure;
- is performed by an independent team of specialists;
- identifies potential security issues in the project.

A characteristic feature of most of the documents examined was that they contain indication of what road safety audit *is not*.

Thus, all documents expressly emphasize that audit is not a verification of project's compliance with standards or best practices, it is an examination task. Audit is not a check of conformance of a finished road to the project. In addition, audit does not consider safety of individual structures.

A separate emphasis on the fact that audit is not a check for compliance with applicable standards is due to many factors, including:

- too much confidence in national standards, without determining whether these standards are actually suitable for safety;
- standards often contain only minimal requirements. Application of several such standards with minimum requirements may lead to a decrease in overall safety of the facility;
- standards usually cover the most general situations, and not all possible ones;
- in some projects, norms that do not correspond to this type of road may be used;
- outdated or inappropriate national norms and standards may be mistakenly used;

– sometimes a combination of various elements in project development can lead to a result that is not the best in terms of security;

– often the designer is pressured to reduce estimated cost of the facility, which can be implemented primarily at the expense of security considerations;

– sometimes changes are made during construction that do not take into account operational safety factors.

The next step examined the objectives of road safety audit. The following audit objectives are indicated in reviewed documents (Tab. 2).

You may notice that the common goal in all the documents reviewed is to identify potential problems with road safety.

Recommendations regarding stages of road safety audit in the documents reviewed are somewhat different. In a generalized form, six stages can be distinguished during planning, design and construction of a road project, at which road safety audit can be carried out. They correspond to generally accepted phases in planning, design, construction, operation and maintenance of roads:

- stage of feasibility study;
- stage of development of project documentation;
- stage of development of working documentation;
- stage of road construction;
- pre-operational stage;
- existing road (road safety inspection).

Table 2

The objectives of road safety audit in reviewed documents

Country	Audit objective
United Kingdom	Identify potential road safety problems that may affect any road users and propose measures to address or mitigate these problems
Ireland	Identify potential safety hazards that could affect any road user to propose measures to address or mitigate these problems
USA	RSA objective is to answer the following questions: What elements of the road can pose a safety problem: to what extent, for which road users, and under what circumstances? What options are there to address or mitigate identified security issues?
Australia	The objective of road safety audit is to identify any existing project safety deficiencies
Canada	The objective of road safety audit: minimize frequency and severity of possible accidents; consider safety of all road users, including vulnerable road users; make sure that all possible measures have been taken to mitigate consequences of road accidents; minimize potentially negative impacts on safety on designed road and on adjacent roads
Asian Development Bank	To minimize the risk of accidents, and to minimize severity of any accidents that may occur at a new road facility

Usually, the earlier the audit is conducted during planning and design process, the easier and cheaper effective changes are achieved that increase the level of security [17].

Existing approach to road safety audit in the Republic of Kazakhstan and directions for its improvement

Document R RK 218-142–2017 “Recommendations on audit and inspection of road safety on public roads” [9] is in force in the Republic of Kazakhstan.

The following definition is given in the document: “Road safety audit: verification of organizations activities results during design, construction and operation of roads for compliance with current requirements of regulatory and technical documents on organization and safety of traffic”.

At the same time, Directive on road infrastructure safety management No 96/2008, European Parliament and Council, Brussels, 2008 is indicated as a source of determination.

However, this source does not contain the above definition. Definition in the European Directive is as follows: “Road safety audit means an

independent detailed systematic and technical safety check relating to the design characteristics of a road infrastructure project and covering all stages from planning to early operation”.

Thus, original source does not say anything about checking for compliance with current requirements of regulatory and technical documents. This approach led to a critical methodological error, as a result of which the document, to a large part, develops provisions that are not related to road safety audits.

As for the audit objectives, they are not explicitly indicated in the document, what significantly complicates the work.

The criteria at which the audit is carried out in accordance with R RK 218-142–2017 do not meet and completely contradict international practice. According to the document, the basis for the audit on public roads are the following:

- receipt of well-grounded complaints and proposals from legal entities or individuals that contain information about violations of requirements for ensuring road safety by road organizations or the public;

- significant changes in organization of traffic, etc.;

– contractual obligations between the Customer and the contractor as a separate form of audit services, and as part of design, technical supervision, as well as diagnostics and certification of roads.

This approach means that the audit is a random procedure, is not mandatory and is not systematic. Conduction of the audit as a response to complaints has no precedent in the world and deprives the procedure authority.

Final results that are expected are not relevant to road safety audit. In accordance with [9], the results of roads audit are used with the following purpose:

- to assess the degree of conformity of technical level indicators, operational condition and maintenance level of roads and road structures with established standards, based on requirements for ensuring traffic safety;
- to rank a local site, road or network by degree of risk of road safety;
- to assess effectiveness of appointment of repair measures on acceptable values of weighted average total accident rate;
- to assess economic efficiency of measures to improve traffic safety;
- to assess the results of activities of road organizations to reduce the level of road accidents and manage “hazardous areas” of roads;
- to establish factors and conditions conducive to occurrence of accidents and areas of their concentration;
- to justify measures for organization and safety of road traffic in the planning of road works and formation of targeted programs to improve road safety.

The above-mentioned tasks in themselves are important enough to improve road safety, however, none of the tasks are solved within the framework of road safety audit in classic appreciation of the term.

Based on the analysis of [9], it can be said that the term “road safety diagnostics” is the most appropriate term for the activity described in the document. Given theoretical errors in [9], development of a new regulatory and technical document is an acceptable way to correct the situation.

Based on the analysis already performed, it can be noted that in developed countries there is a

similar approach to the basic definitions, to selection of audit team and to the requirements for team members, to the main stages of road safety audit. There are some differences in approaches to the stages of the road life cycle, which is explained by peculiarities of national legislation in the field of construction and terminology used.

Road safety audit, being a formal standardized procedure, involves implementation of certain actions. These actions can be summarized as follows: making a decision on the need for audit, selection of audit team, exchanging information before audit conduction, checking drawings and documents in office conditions, driving of audit team on the road in the daytime and at night, preparing of audit report, discussion of audit report with the project team, writing of a response report by the project team. A separate stage, which is adjacent to road safety audit, but may not be considered directly as audit, is monitoring of road safety after putting the road into operation, which is carried out at different times: after a year, 3 years, sometimes more.

Experienced engineers with education and experience in the field of organization and safety of traffic, road design are involved in the audit. An important requirement is continuous improvement of theoretical and practical training of auditors in specialized courses. The audit team includes at least 2 people, one of whom is the team leader.

Currently, the Republic of Kazakhstan has embarked on a gradual introduction of “road forgiving mistakes” approach to the design and operation of roads. This fact should also be considered when revising road safety audit manual. There are examples of such a specialized approach to audit in the world. For example, in audit manual, which operates in Australia and, especially, in New Zealand [18], all requirements and recommendations are set out in accordance with implementation of Safe System concept, which is actively implemented in these countries.

CONCLUSIONS

1. Approaches to road safety audit in developed countries are similar. In most cases, when determining an audit, it is emphasized that the audit is

a formal procedure, performed by independent team of specialists, and also identifies potential security problems in the project.

2. Characteristic feature of RSA manuals in developed countries is that they provide an indication of what a road safety audit is not. All documents expressly emphasize that an audit is not a verification of a project's compliance with standards or best practices.

3. Approach to road safety audit currently adopted in the Republic of Kazakhstan contains critical methodological errors, as a result of which the document, to a large part, develops provisions that are not related to road safety audit.

4. An acceptable way to remedy the situation is to develop a new regulatory and technical document.

REFERENCES

- Jacobs G., Aeron-Thomas A., Astrop A. (2000) *Estimating Global Road Fatalities*. Crowthorne, Transport Research Laboratory, TRL Report, No 445.
- World Health Organization and the World Bank (2004) *World Report on Road Traffic Injury Prevention*. Geneva.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (2010) *Highway Safety Manual*. 1st ed. Washington, DC.
- Roads and Highways Department (RHD), Ministry of Communication, Bangladesh (May 2005) *Guidelines for Road Safety Audit*. Dhaka.
- Institute of Transportation Engineers (ITE), U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. *Road Safety Audits: an Emerging and Effective Tool for Improved Safety*. Available at: www.ite.org/technical/IntersectionSafety/RSA.pdf. (Accessed 3 July 2013).
- Transportation Research Board (2003) *National Cooperative Highway Research Program. NCHRP Synthesis 321. Road Safety Tools for Local Agencies: a Synthesis of Highway Practice*. Washington, DC.
- European Directive on Road Safety Management [2008/96/EC]. *Guidelines for Competent Authorities on the Application of the Directive*. London: Department for Transport, 2011. Available at: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/3565/guidelines.pdf. (Accessed 6 August 2018).
- Kapskii D. V., Bogdanovich S. V. (2018) Ways and Means for Road Infrastructure Safety Improvement in Several Countries of the Customs Union. *Avtomobil'nye Dorogi i Mosty = Roads and Bridges*, (2), 95–102 (in Russian).
- R RK 218-142–2017 *Recommendations on the Audit and Inspection of Road Safety on Public Roads*. Available at: https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=39278623#pos=0;0 (in Russian).
- ODM 218.6.027–2017 *Recommendations for Road Safety Audit in Design, Construction and Operation of Roads*. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/456090610> (in Russian).
- TKP [Technical Code of Common Practice] 590–2016 *Roads. Requirements for Inspection of Road Safety System*. Available at: <https://rovar.info/tkp-590-2016-avtomobilnye-dorogitrebvanija-k-obsledovaniju-sistemy-obespechenija-bdd>.
- Institution of Highways and Transportation (November, 2017) *HD 19/15 Guidelines for Road Safety Audit*.
- Transport Infrastructure Ireland (2017) *Standard NRA HA 19 Road Safety Audit Guidelines*. Dublin.
- US Department of Transportation (2006) *FHWA Road Safety Audit Guidelines*. Washington, DC.
- Guide to Road Safety. Part 6: Road Safety Audit*. No AGRS06-09. Austroads Publication, 2009.
- Ho G., Zein S., de Leur P. (2001) *The Canadian Road Safety Audit Guide*. Ottawa, Transportation Association of Canada. 81.
- CAREC *Road Safety Engineering Manual 1: Road Safety Audit*. Asian Development Bank, 2018. <http://doi.org/10.22617/TIM179172-2>.
- NZ Transport Agency (2013) *Road Safety Audit Procedures for Projects*. Wellington. Available at: <https://nzta.govt.nz/assets/resources/road-safety-audit-procedures/docs/road-safety-audit-procedures-tfm9.pdf>.

Received: 08.10.2019

Accepted: 10.12.2019

Published online: 29.01.2021

Improving the Energy Performance of Traction Electric Drive Vehicles in Solving Electric Braking

V. Herasymenko¹⁾, N. Shpika¹⁾, M. Smyrnyi¹⁾, D. Khuruzha¹⁾

¹⁾O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Kharkiv, Ukraine)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Abstract. The effectiveness of the electric braking system largely depends on how the braking is carried out, whether the braking characteristics that it forms are acceptable for a given vehicle, how simple and reliable the technical solutions embedded in the system are, and where the braking energy is used. With electric braking, it is possible not only to extinguish the electrical energy on the braking resistor, but also to send it back to the storage device and again use it in traction mode. This paper analyzes the most common methods of electric braking used in electric braking systems for traction electric drives that are in operation on vehicles. As the main criterion for evaluating the method of electric braking, its energy indicators are selected. The results of scientific research of the proposed new method of electric braking, which provides better energy performance and new technical solutions for its implementation, are considered. When implementing this method, DC motors are operated by sequential excitation generators. The current in the field windings is regulated by a DC-DC-converter. Energy in the power circuit is accumulated in storage devices and used in traction mode. When the storage devices are filled, the energy in the power circuit is extinguished by the braking resistor, and the energy from the output of the DC-DC-converter is used for own needs. In this case, braking characteristics are formed as in generators of independent excitation. To increase the braking efficiency at low speeds, it is necessary to smoothly regulate the resistance of the braking resistors by shunting them with transistor switches.

Keywords: transport, traction electric drive, electric braking, electric motor, DC-DC-converter, brake resistor

For citation: Herasymenko V., Shpika N., Smyrnyi M., Khuruzha D. (2021) Improving the Energy Performance of Traction Electric Drive Vehicles in Solving Electric Braking. *Science and Technique*, 20 (1), 52–57. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-52-57>

Повышение энергетических характеристик тяговых электромобилей в решении проблемы электрического торможения

Магистр техн. наук В. Герасименко¹⁾, канд. техн. наук, доц. Н. Шпика¹⁾,
докт. техн. наук, проф. М. Смирный¹⁾, Д. Хуружа¹⁾

¹⁾Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова (Харьков, Украина)

Реферат. Эффективность системы электрического торможения во многом зависит от того, каким способом оно осуществляется, приемлемы ли для данного транспортного средства тормозные характеристики, которые она формирует, насколько просты и надежны технические решения, заложенные в систему, и куда используется энергия торможения. При электрическом торможении можно не только гасить электрическую энергию на тормозном резисторе, но и отдавать обратно на накопитель и снова использовать в тяговом режиме. В статье проанализированы наиболее распространенные способы электрического торможения, применяемые в системах электрического торможения тяговых электроприводов, которые находятся в эксплуатации на транспортных средствах. В качестве основного критерия при оценке способа электрического торможения выбраны его энергетические показатели. Рассмотрены результаты научных исследований предложенного нового способа электрического торможения, обеспечивающего лучшие энергетические показатели, и новые технические решения его реализации. В случае применения указанного способа электродвигатели постоянного тока работают генераторами последовательного возбуждения. Ток в обмотках возбуждения регулируется с помощью преобразователя постоянного тока. Энергия в силовой цепи накапливается в накопителях и используется в тяговом режиме. При заполнении накопителей энергия в силовой цепи гасится на тормозном резисторе, а энергия с выхода преобразователя постоянного тока используется для собственных нужд.

Адрес для переписки

Герасименко Виталий
Харьковский национальный университет
городского хозяйства имени А. Н. Бекетова
ул. Маршала Бажанова, 17,
61002, г. Харьков, Украина
Тел.: +38 099 388-30-28
Twixvi@gmail.com

Address for correspondence

Herasymenko Vitalii
O. M. Beketov National University
of Urban Economy in Kharkiv
17, Marshal Bazhanov str.,
61002, Kharkiv, Ukraine
Tel.: +38 099 388-30-28
Twixvi@gmail.com

При этом формируются тормозные характеристики, как у генераторов независимого возбуждения. Для повышения эффективности торможения в области низких скоростей необходимо плавно регулировать сопротивление тормозных резисторов путем шунтирования их транзисторными ключами.

Ключевые слова: транспорт, тяговый электропривод, электрическое торможение, электродвигатель, преобразователь постоянного тока, тормозной резистор

Для цитирования: Повышение энергетических характеристик тяговых электромобилей в решении проблемы электрического торможения / В. Герасименко [и др.] // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 1. С. 52–57. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-52-57>

Introduction

Traction electric drives are introduced more and more every year in transport. They are used in urban electric vehicles, mining trucks, hybrid cars, electric cars, electric buses and other modes of transport. At the same time, the dynamic, energy and environmental performance of vehicles is significantly improved, it becomes possible to realize greater power and carrying capacity on mining trucks, introduce electric braking instead of mechanical, and use a mechanical brake as a backup. With electrical braking, it is possible not only to extinguish the electric energy on the braking resistor, but also, if possible, send it back to the power source or drive and use it again in traction mode. The effectiveness of the electric braking system largely depends on how the braking is carried out, whether the braking characteristics that it forms are acceptable for a given vehicle, how simple and reliable the technical solutions embedded in the system are, and where the braking energy is used.

Literature review

Significant attention is being paid to improving the energy and environmental performance of vehicles, not only in the EU, but throughout the world.

In [1], the use of various concepts of traction drives in the Czech Republic and in the world is discussed and evaluated, the advantages and disadvantages of the new concept and the possibility of using systems with outdated types are evaluated.

In [2], the possibilities for reducing electricity consumption in electric systems of urban public transport using audit of their electric system were identified. To substantiate the importance of these problems, a mathematical model of the energy balance of the electric system of urban public transport and its components is presented.

In [3, 4], an improvement in the energy performance of traction electric drive systems of tram cars in some cities of Ukraine was shown to be up to 35 % due to the introduction of electrical equipment such as “TV Progress” based on a pulse converter from ALSTOM.

In the Republic of Belarus, trams, trolleybuses, electric buses are produced in large quantities for urban electric vehicles with a modern traction electric drive, which has a positive effect on the ecology of cities and energy conservation of resources. Requirements to increase the reliability of transport and reduce operating costs dictate the need for modern traction control systems for electric drives in urban electric vehicles. The use of transistor control systems for traction motors can significantly increase efficiency by reducing energy consumption, reducing maintenance costs and reducing downtime of mobile units [5].

The issues of reforming urban electric transport in Ukraine are determined by the State program for its development [6]. There are two ways to solve them. The first is the use of pulsed DC-DC-converters on a modern elemental base with a microprocessor control system and standard traction DC electric motors of sequential excitation. This is a more economical option. The second way is the use of autonomous voltage inverters with traction asynchronous electric motors and a microprocessor control system. In Ukraine, the use of pulse converters has become more widespread in urban electric transport. This is because tram cars of the T3M type are operated with pulse converters [7].

Given that in Ukraine, most urban electric vehicles are equipped with a traction electric drive with DC motors with sequential excitation and obsolete brake equipment, the issues of improving the electric braking system of these vehicles and improving their energy performance are very relevant.

Research methodology

The most common methods of electric braking used in electric braking systems of traction electric drives that are in operation on vehicles are analyzed. As the main criterion in assessing the method of electric braking, its energy indicators are selected. A comparative analysis should also be guided by the following criteria:

- compliance with modern technical requirements;

- modernization costs;
- operating costs;
- reliability;
- unification of electrical equipment.

Description

An analysis of electric braking systems that use sequential excitation DC motors has shown that one of the most common braking methods is the method in which the motors operate with independent excitation DC generators [8]. The excitation windings are powered from an adjustable voltage source that receives energy from the network, and the anchor windings are shorted to brake resistors. Braking energy is dissipated on the braking resistors in the form of heat. Such an electric braking system provides reliable entry into the braking mode, allows you to generate braking characteristics with constant force for equidistant motion, which is very important for an exact stop. This ensures restrictions on the maximum speed, switching ability of traction motors, adhesion and maximum excitation current.

The disadvantages of this braking method include the low braking efficiency at low speeds, the energy consumption from the network for excitation, and the dissipation of all braking energy on the braking resistors in the form of heat. In addition, when the network is de-energized, electrical braking is generally impossible.

There is also known a method of electrical braking, in which traction motors operate as sequential excitation generators and the electrical energy obtained during braking is dissipated in the form of heat on braking resistors [9]. Generators are excited by self-excitation. The braking system generates characteristics that are more suitable for braking on a slope than for stopping. For stopping braking, the resistance of the braking resistors is gradually reduced.

The disadvantages of this method of braking should include low energy indicators, since all braking energy is extinguished on the braking resistors, as well as entering the braking mode with delay in the low-speed region. To accelerate the self-excitation of traction motors in the generator mode, use additional power to the field windings from the battery or use a parallel field winding.

A combined method of electric braking and a variable structure electric braking system are

proposed, which provide braking at the initial stage as with sequential excitation generators, followed by automatic regulation of the excitation current of the generators using a DC-DC converter by shunting the drive excitation windings of electric motors with the input of this converter [10]. In this case, braking characteristics are formed with constant force, there is no need to consume electric energy from the network to excite electric motors, and the energy from the converter output can be used for your own needs.

To increase the braking efficiency at low speeds, it is necessary to regulate smoothly the resistance of the braking resistors by shunting them with transistor switches.

To effectively enter the braking mode, the following is proposed. Considering that the electromotive force of the engine in the generator mode is proportional to the magnetic flux and revolutions $E = C\Phi n$, it is necessary to apply a pulse from the DC-DC-converter in the initial stage of braking, inversely proportional to the speed of the engine speed.

The operation of the braking system with a variable structure is explained by the circuit shown in Fig. 1.

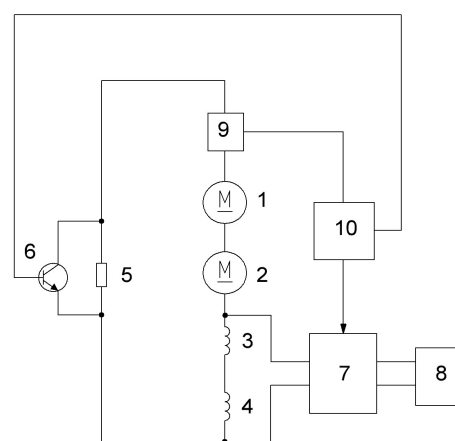


Fig. 1. Functional diagram of a variable structure braking system

The scheme works as follows. When switching to electric braking mode, the automatic control system 10 includes a transistor switch 6, while the anchor windings 1, 2 and the excitation windings 3, 4 of the electric motors are turned on as in sequential excitation generators and are short-circuited. Due to the residual magnetization in the field windings 3, 4, on the armature windings 1, 2,

an electromotive force will appear, under the action of which a current will flow, which is measured by the current sensor 9. After the current reaches the set value, the automatic control system 10 turns off the transistor switch 6 and turns on DC-DC-converter 7, which shunts the excitation windings 3, 4 with its input and regulates the magnitude of the current through the excitation windings 3, 4, as with independent excitation of electric motors. In this case, the DC-DC-converter 7 gives off electric energy to its own needs 8. In the low-speed zone, to increase the braking efficiency, the automatic control system 10 turns on the transistor switch 6 and puts it into pulse-width modulation mode, while the equivalent resistance of the braking resistor decreases and expands area of effective braking at low speeds.

To implement the proposed method, the structure of the braking system is required, in which the current in the field windings during braking does not change direction. For this purpose, the structure described in [11, 12] is most suitable, where the pulse converter is made according to the scheme of a single-phase transistor bridge with reverse diodes, the diagonal of which includes series-connected anchor windings of electric motors for reversing the direction of movement (Fig. 2).

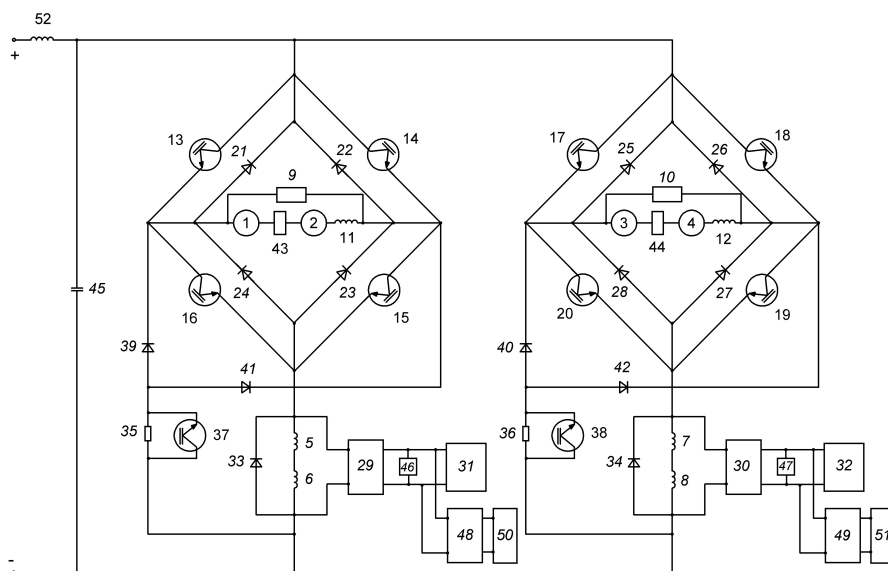


Fig. 2. Diagram of an electric braking system with a variable structure

The scheme works as follows. In the “Braking” mode, when the vehicle moves in the “Forward” direction, transistors 15, 19 and 37, 38 are turned on. After the current flows through the armature

windings of the electric motors 1, 2 and 3, 4 and the field windings 5, 6 and 7, 8, the first DC-DC-converters 29, 30 to regulate the current through the field windings 5, 6 and 7, 8 and turn off the transistors 37, 38. In this case, the mode of electrical resistive braking occurs and part of the energy through the first DC-DC-converters 29, 30 goes to energy storage 31, 32 and through other DC-DC-converters 48, 49 to the chains of their own needs 50, 51. At the same time formed as a braking performance from an independent generator excitation. In the low-speed range, transistors 37, 38 turn on and go into pulse-width modulation mode to increase braking efficiency.

Let us determine the relationship between the parameters of the DC-DC-converter of the proposed circuit and the coefficient of regulation of the excitation of the traction motor.

Based on [13], for a DC-DC-converter, the ratio

$$U_{OUT} = \frac{U_{IN}}{1-\gamma}, \quad (1)$$

where U_{OUT} – DC-DC-converter output voltage; U_{IN} – converter input voltage, which corresponds to the voltage drop across the series excitation winding of the traction motor; γ – DC-DC-converter duty cycle.

In accordance with the law of conservation of energy, the following can be written:

$$I_{IN}U_{IN} = I_{OUT}U_{OUT}K_{DC}, \quad (2)$$

where I_{IN} , I_{OUT} – respectively, the input and output current of the DC-DC-converter; K_{DC} – converter efficiency.

We substitute in the expression (2) the value of the output voltage of the converter

$$I_{IN}U_{IN} = I_{OUT} \frac{U_{IN}}{1-\gamma} K_{DC}. \quad (3)$$

In accordance with the scheme of the device, the output current of the DC-DC-converter is equal to

$$I_{OUT} = \frac{1-\gamma}{K_{DC}} I_{IN}. \quad (4)$$

In expression (4), you can replace the input current of the DC-DC-converter with the expression ($I_A - I_F$)

$$I_{OUT} = (I_A - I_F) \frac{1-\gamma}{K_{DC}}, \quad (5)$$

where I_A , I_F – respectively, the current of the anchor winding and the field winding of the traction motor.

Dividing expression (5) by the current of the armature of the traction motor, we obtain

$$\frac{I_F}{I_A} (1-\gamma) = (1-\gamma) - \frac{I_{OUT} K_{DC}}{I_A}. \quad (6)$$

Since the ratio of the currents of the field winding and the anchor winding of the traction motor is equal to the coefficient of regulation of its excitation

$$\frac{I_F}{I_A} = \alpha, \quad (7)$$

the coefficient of regulation of the excitation of the traction motor is equal to

$$\alpha = \frac{(1-\gamma) - \frac{I_{OUT}}{I_A} K_{DC}}{1-\gamma}. \quad (8)$$

Based on the fact that the ratio of the output current of the DC-DC-converter I_{OUT} to the current of the anchor winding of the traction motor I_A is equal to the load factor of the DC-DC-converter K_L , we finally obtain the expression for the coefficient of regulation of the excitation of the traction motor

$$\alpha = \frac{(1-\gamma) - K_L K_{DC}}{1-\gamma}. \quad (9)$$

Based on expression (9), the dependences of the change in the coefficient of regulation of the excitation of the traction electric motor α on the fill factor of the DC-DC-converter γ for various values of K_L and $K_{DC} = 0.9$ are constructed. These dependencies are presented in Fig. 3.

From the characteristics shown in Fig. 3, it can be seen that they are non-linear. With decreasing load factor of the DC-DC-converter K_L , the non-linearity increases. Given that in practice the coefficient of regulation of the excitation of the traction motor α is not realized below a value of 0.3, it is possible to determine the working area for the traction motor in the electric braking mode. The working area when using the proposed method for a traction motor in electric braking mode is limited by the value of the load factor $K_L = 0.1$, the value of the excitation regulation coefficient $\alpha = 0.3$ and the value of the load factor $K_L = 0.5$.

Further improvement of the electric braking system with a variable structure is possible due to the accumulation of braking energy of the power circuit

in the drives with its subsequent use in traction mode. Such a technical solution is shown in Fig. 4.

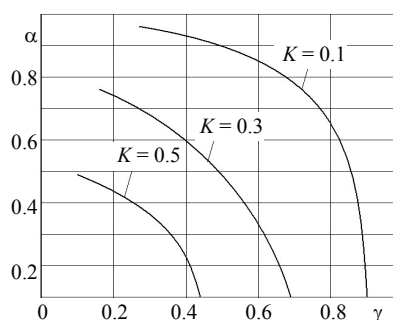


Fig. 3. The dependence of the coefficient of regulation of the excitation of the traction motor α from the fill factor DC-DC-converter γ

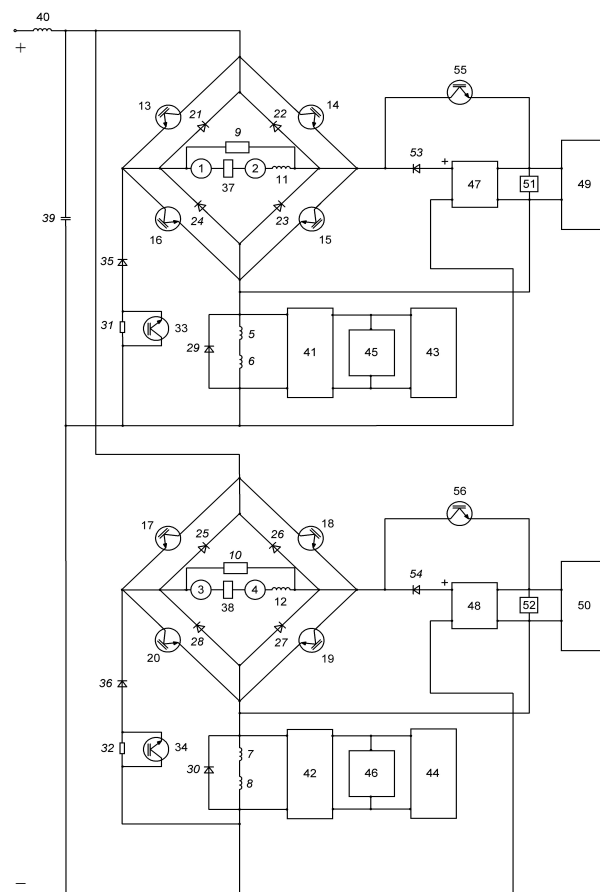


Fig. 4. An improved diagram of an electric braking system with a variable structure

An improved circuit of the electric braking system with a variable structure works as follows.

When the electric braking mode is switched on, transistors 15 and 19, 33 and 34 are turned on. In this case, the armature windings 1 and 2 and the field windings 5 and 6 of the motors, as well as the anchor windings 3 and 4 and the field windings 7

and 8 are turned on as sequential field generators and shorted between each other shortly.

Due to the residual magnetization in the field windings 5, 6 and 7, 8, an electromotive force will appear on the armature windings 1, 2 and 3, 4, under the influence of which a current will flow, which is measured by current sensors 37 and 38. After the current reaches the set value, the transistors 15 and 19 and turn on transistors 55, 56, as well as the first DC-DC converters 41 and 42. Braking current will flow through transistors 55 and 56, the inputs of the second drives 49 and 50, the field windings 5, 6 and 7, 8, transistors 33, 34 and motor anchors 1, 2, and 3, 4. The first DC-DC-converters 41 and 42 by their inputs bypass the field windings 5, 6, and 7, 8, and thereby regulate the current in them as if the independent excitation of the electric motors. From the outputs of the first DC-DC-converters 41 and 42, energy is supplied to the first drives 43 and 44 and used for their own needs. If other drives 49 and 50 are full and braking continues, the transistors 55 and 56, 33 and 34 turn off and the transistors 15, 19 turn on and the braking energy is converted into heat on the braking resistors 31 and 32. In the low-speed zone, transistors 33 and 34 go into pulse-width modulation mode and reduce the equivalent braking resistance, provides effective braking. In this case, braking characteristics are formed as in independent excitation generators. The energy stored in storage 49, 50 is used in traction mode.

CONCLUSIONS

1. The analysis of the most common methods of electric braking of vehicles is carried out, on the basis of which a combined method and a system of electric braking with a variable structure are proposed.

2. When implementing this method, DC motors operate as sequential excitation generators. The current in the field windings is regulated using a DC-DC-converter. Energy in the power circuit is accumulated in the drives and then used in traction mode. When the drives are full, the energy in the power circuit is extinguished by the brake resistor, and the energy from the output of the DC-DC-converter is used for own needs. In this case, braking characteristics are formed as in independent excitation generators.

3. The proposed method has significantly improved the energy performance of the electric braking system.

REFERENCES

1. Veg L., Laksar J., Pechanek R. (2017) Overview of Different Concepts of Traction Drives with Regard to High-Speed PMSM. *18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/EPE.2017.7967236>.
2. Felea I., Csuzi I., Barla E. (2013) Modelling and Assessing Energy Performance of an Urban Transport System with Electric Drives. *Promet – Traffic & Transportation*, 25 (5), 495–506. <https://doi.org/10.7307/ptt.v25i5.1207>.
3. Cerny M., Kachimov V. (2009) Introduction of Energy-Efficient Equipment and Technologies on the Rolling Stock of Urban Electric Transport of Ukraine. *Kommunal'noe Khozyaistvo Gorodov* [Communal Services of Cities], 88, 263–268 (in Russian).
4. Cerny M., Kachimov V. (2009) Introduction of Energy-Efficient Equipment and Technologies on the Rolling Stock of Urban Electric Vehicles of Ukraine. *Stalii Rozvitok Mist. Elektrichnii Transport – Perspektivi Rozvitku ta Kadrove Zabezpechennya* [Stalii Rozvitok Mist. Electric Transport – Prospects for Development and Personnel Security: Materials of the International Science-Practical Conference]. Kharkiv, KHNAMG, 58–59 (in Russian).
5. Kazachenko V. V. (2017) Energy Optimization of Traction Electric Drives. *Issledovaniya i Razrabotki v Oblasti Mashinostroeniya, Energetiki i Upravleniya: Materialy XVII Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. Studentov, Aspirantov i Molodykh Uchenykh, Gomel', 27–28 Apr. 2017 g.* [Research and Development in the Field of Mechanical Engineering, Energy and Management: Materials of the XVII Intern. Scientific and Technical Conf. Students, Graduate Students and Young Scientists, Gomel, April 27–28, 2017]. Gomel, Sukhoi State Technical University of Gomel, 308–311 (in Russian).
6. Kramarenko R. M. (2008) Stan and the Main Lines of Convenience to the Robots of Moscow Electric Transport in the Minds of Today. *[International Conference and Technical Exhibition: "Moscow Electric Transport. Protection of the Steel Function and Development"]*. Zbirka Dopoviday. Yalta, 8–18 (in Russian).
7. *Electrical Equipment of the T6V5 Tram Car – (T3M)*. Prague, CKD Publ., 1982. 310.
8. Tulupov V. D. (1976) *Automatic Control of Traction and Braking Forces of Electric Rolling Stock*. Moscow, Transport Publ., 136–138 (in Russian).
9. Tikhmenev B. N., Trakhtman L. M. (1980) *Rolling Stock of Electrified Railways. Theory of Electrical Equipment. Electric Circuits and Devices*. Moscow, Transport Publ., 147–151 (in Russian).
10. Gerasimenko V. A., Shpika M. I. (2018) The Method of Automatic Control of Traction Motors of Series Excitation in the Mode of Electric Braking. Patent of Ukraine No 126978 (in Ukrainian).
11. Shpika N. I., Andreichenko V. P., Besarab A. I. (2015) Improving the Technical Efficiency and Energy Performance of the Traction Electric System of a Tram Car. *Zbirnik Naukovikh Prats' Ukrain's'kogo Derzhavnogo Universitetu Zaliznichnogo Transportu = Collection of Scientific WORKS of Ukrainian State University of Railway Transport*, 153, 90–98 (in Ukrainian).
12. Besarab A. I., Shpika M. I., Andriyenko V. P., Khvorost M. V. (2015) Control Device for Traction Electric Motors of Sequential Excitation of Electric Rolling Stock. Patent of Ukraine No 101885 (in Ukrainian).
13. Shpika N. I., Andreichenko V. P., Gerasimenko V. A. (2015) Improving the Methods for Controlling the Speed of Traction DC Motors of Sequential Excitation. *Zbirnik Naukovikh Prats' Ukrain's'kogo Derzhavnogo Universitetu Zaliznichnogo Transportu = Collection of Scientific WORKS of Ukrainian State University of Railway Transport*, 153, 84–90 (in Ukrainian).

Received: 08.10.2019

Accepted: 10.12.2019

Published online: 29.01.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-58-65>

УДК 662.8.05

Твердое топливо на основе отходов малоиспользуемых горючих энергоресурсов

Академик НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Б. М. Хрусталеv¹⁾,
кандидаты техн. наук А. Н. Пехота²⁾, Нгуен Тху Нга³⁾, Ву Минь Фап³⁾

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

²⁾Белорусский государственный университет транспорта (Гомель, Республика Беларусь),

³⁾Научный энергетический институт, Вьетнамская академия наук и технологий (Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам)

©Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Представлены основные тенденции образования отходов в зависимости от роста мирового ВВП и численности населения планеты. Рассмотрены основные направления концепции национальных стратегий устойчивого развития с учетом проблем энерго- и ресурсосбережения, а также необходимости рационального использования природных и вторичных ресурсов во многих странах мирового сообщества. Использование энергетического потенциала горючих отходов, не нашедших технологического применения, для многих государств – одно из приоритетных направлений в области нетрадиционной энергетики. В статье представлена технология брикетирования многокомпонентных горючих составов в твердое топливо в разных областях. Разработанная технология позволяет перерабатывать отходы производства путем их брикетирования с добавлением различных связующих веществ. На примере связующего компонента в виде вязких углеводородсодержащих отходов показаны основные технологические особенности получения твердого многокомпонентного топлива. Описано оборудование электрогидравлической обработки, работающее в составе линии подготовки к брикетированию применяемых нефтесодержащих отходов, позволяющее уменьшать содержание серы в используемых отходах, что дает возможность регулировать экологические характеристики выбросов вредных веществ на предельно допустимом уровне. С учетом аспектов применения технологии влажного брикетирования материалов отражено влияние влажности на производительность в зависимости от содержания связующего компонента. Предложенный алгоритм решения поставленной задачи позволяет рационально использовать некондиционные горючие производственные отходы для получения многокомпонентного твердого топлива, при этом на стадии производства учитываются энергетические и экологические аспекты.

Ключевые слова: твердое топливо, многокомпонентный состав, связующее, углеводородные отходы, теплота сгорания, технология, брикетирование, выбросы, отходы, нетрадиционные энергоресурсы

Для цитирования: Твердое топливо на основе отходов малоиспользуемых горючих энергоресурсов / Б. М. Хрусталеv [и др.] // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 1. С. 58–65. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-58-65>

Solid Fuel Based on Waste of Low-Utilized Combustible Energy Resources

B. M. Khrustalev¹⁾, A. N. Pekhota²⁾, Nguyen Thuy Nga³⁾, Vu Minh Phap³⁾

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

²⁾Belarusian State University of Transport (Gomel, Republic of Belarus),

³⁾Institute of Energy Science, Vietnam Academy of Science and Technology (Hanoi, Socialist Republic of Vietnam)

Abstract. The paper presents main trends in growth and generation of waste, depending on increase of world GDP and the population of the planet. The main directions in extending the concept of national strategies for sustainable development have been considered with due account of energy and resource conservation problems, as well as the need for the rational use

Адрес для переписки

Хрусталеv Борис Михайлович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-93-52
tg_vfes@bntu.by

Address for correspondence

Khrustalev Boris M.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-93-52
tg_vfes@bntu.by

of natural and secondary resources in all countries of the world community. The energy potential use of combustible waste that has not found technological application is considered by many countries as one of the priority areas in the field of unconventional energy. The paper describes the main directions in application of the technology for briquetting multicomponent compositions into solid fuel. The developed production technology makes it possible to process waste products by briquetting them with the addition of various binders, and on the example of a binder component in the form of viscous hydrocarbon-containing waste, the main technological features of obtaining solid multicomponent fuel are presented in the paper. The paper describes the equipment for electrohydraulic treatment, which operates as a part of the preparation line for briquetting of the applied oily waste and that allows to reduce the sulphur content in the waste used, and such approach in general permits to regulate the environmental characteristics of harmful substance emissions at the maximum acceptable level. Taking into account the application aspects of the technology for wet briquetting of materials, the paper reflects the main results of the obtained dependences of humidity on productivity according to the content of the binder component. The proposed algorithm for solving the problem makes it possible to rationally use of substandard combustible industrial waste to obtain a multicomponent solid fuel, while at the production stage, the energy and environmental aspects of the resulting fuel are taken into account with due consideration of the component composition of the fuel.

Keywords: solid fuel, multicomponent composition, binder, hydrocarbon waste, heat of combustion, technology, briquetting, emissions, waste, unconventional energy resources

For citation: Khrustalev B. M., Pekhota A. N., Nguyen Thuy Nga, Vu Minh Phap (2021) Solid Fuel Based on Waste of Low-Utilized Combustible Energy Resources. *Science and Technique*. 20 (1), 58–65. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-58-65> (in Russian)

Введение

В последние десятилетия многими странами в рамках развития концепции национальных стратегий устойчивого развития осуществляется стремительный переход к эффективному использованию производственных отходов, отходов потребления и биомассы с применением технологий сжигания и получения топлива. Например, страны Евросоюза декларируют до 2030 г. замещение четвертой части потребляемого топлива для транспорта за счет жидких видов биотоплива, получение которых будет осуществляться с помощью технологий переработки различных отходов и биомассы. Такие достижения в использовании нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в энергетике возможны только за счет накопленного исследовательского, технологического и практического опыта вовлечения горючих производственных и бытовых отходов, а также биомассы как источников химической энергии. Развитие данного направления применения горючих отходов в качестве нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в энергетике в первую очередь связано с увеличивающимся мировым потреблением, обеспечиваемым ростом как национального, так и мирового ВВП (рис. 1). Так, по данным Института экономики НАН Беларуси [1], представленным в табл. 1, численность населения на нашей планете прибавляется по 1 млрд чел. последние 60 лет с динамикой каждые 13 лет. А в ближайшей перспективе этот период будет уменьшаться до 11–8 лет, что неразрывно связано с растущей необходимостью использования отходов жизнедеятельности человека и производств.

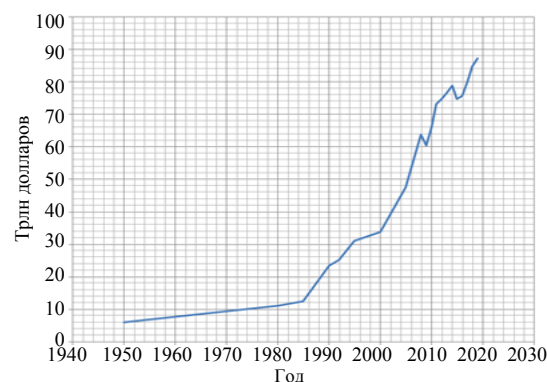


Рис. 1. Тенденция роста ВВП в странах мира за 1950–2019 гг.

Fig. 1. World GDP growth trend in the period of 1950–2019

Таблица 1
Динамика роста численности населения на планете Земля

Population growth dynamics of people on planet Earth

Годы, в которые возможно выполнить расчет населения	Количество населения планеты Земля, млрд чел.	Период между годами, через лет
1805	1	555 (с 1250 г.)
1927	2	122
1959	3	32
1974	4	15
1987, 11 июля	5	13
1999, 12 октября	6	12
2011, 31 октября	7	12
2020, 31 декабря	7,858772994*	9

* Предполагаемое количество населения на конец 2020 г.

На фоне данных табл. 1, согласно оценкам ООН, ежегодно из недр Земли извлекается около 100 млрд т полезных ископаемых. В том числе на планете скопились сотни миллиар-

дов тонн промышленных отходов (ежегодно в США их объем увеличивается на 4,5 млрд т, в Западной Европе – на 2,0 млрд т, в Японии – на 1,3 млрд т) [2]. Не лучше ситуация и с использованием твердых коммунально-бытовых отходов. Ожидается, что к 2030 г. человечеству потребуется на 50 % больше продовольствия и соответственно различных минерально-сырьевых ресурсов, чем сегодня. В связи с ростом населения и развитием мировой экономики к 2035 г. глобальное потребление энергии увеличится примерно на 50 % по сравнению с потреблением энергии в настоящее время.

Становится очевидным, что уже в обозримом будущем многие страны, в первую очередь с развитой системой экономики и производства, могут начать испытывать дефицит в природных энергетических ресурсах. С учетом соотношения темпов наращивания объемов использования энергетических ресурсов с обеспеченностью в мире запасами органических топлив можно ожидать, что при существующих темпах ежегодного спроса ситуация будет выглядеть следующим образом. Например, спрос на электроэнергию в цивилизованных странах ежегодно будет увеличиваться примерно на 2,5–3,0 %. В соответствии с этим обеспеченность в мире запасами органических топлив составит (по разным источникам): по нефти – 25–48 лет, по газу – 35–64 года, по углю – 228–330 лет.

Все это свидетельствует об остроте проблем энергосбережения, а также о необходимости рационального использования природных и вторичных ресурсов во всех странах мирового сообщества. В то же время последними исследованиями установлено, что экономически оправданное применение горючих бытовых и производственных отходов как энергетического топлива позволяет покрыть 26 % мировой энергетической потребности.

Технология получения MSF-топлива

В рамках решения вопросов обеспечения эффективного использования энергетических ресурсов учеными и исследователями многих стран проводятся изыскания и анализируется потенциал возможности более широкого применения нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, в том числе и от использования производственных, бытовых и других отходов.

Одним из путей решения проблем возврата отходов, не нашедших технологического применения в деловом обороте, является их использование в качестве топлива. При этом не

всегда горючие отходы находятся в том виде, в котором они пригодны для применения, по причине повышенной влажности, окислительных процессов, седиментации, внешнего вида и т. п. А это затрудняет и порой останавливает обладателя отходов в их использовании. Также зачастую проблемой являются не только вопросы, связанные с подготовкой имеющегося сырья к брикетированию, но и с формированием процессов создания топлива, обеспечивающего качественные эксплуатационно-технические характеристики, учитывающие оптимальный с энергетической и экологической точек зрения сбалансированный состав топлива.

Получение такого топлива достигается применением разработанных технологий многокомпонентного брикетирования, которое названо авторами MSF-топливо (англ. – multicomponent solid fuel) [1]. На рис. 2 представлена принципиальная технологическая схема многокомпонентного брикетирования с использованием связующих компонентов или веществ.

Технологии получения MSF-топлива основаны на влажном брикетировании многокомпонентных смесей с использованием связующих компонентов или материалов, обеспечивающих в составе брикетируемой смеси процессы объединения мелких разобщенных частиц в крупные структурные соединения с требуемыми геометрическими, механическими параметрами и необходимыми энергетическими свойствами.

Принципиальная технологическая схема многокомпонентного брикетирования представляет собой использование различных измельченных горючих отходов растительно-древесного происхождения (РД-отходов). К ним, как правило, относят отходы деревообработки, лесозаготовок, лузгу, костру и т. п. Они в большинстве разработанных многокомпонентных составов являются базовым компонентом, к которому можно добавлять другие виды горючих отходов в определенном (исследованном) соотношении. Например, возможно добавление таких горючих компонентов, не нашедших технологического применения (горючие отходы НТП), как отработанные нефтесодержащие сорбенты, топливные и масляные элементы фильтров, опилки и ветошь, насыщенные нефтепродуктами, осадки сточных вод очистных сооружений, отходы животноводства и птицеводства, коммунально-бытовые отходы и т. п. Важным условием их применения является определенный технологический цикл подготовки этих материалов, который рассмотрим отдельно.

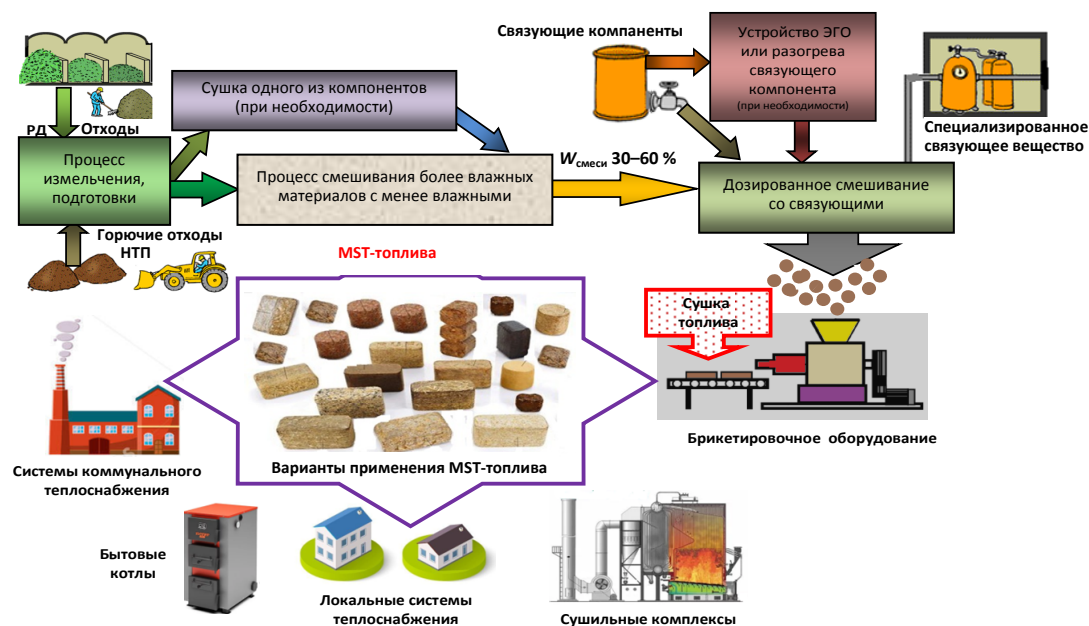


Рис. 2. Принципиальная технологическая схема брикетирования MSF-топлива с использованием связующих методом непрерывного брикетирования влажных многокомпонентных составов

Fig. 2. Basic technological scheme of MSF-fuel briquetting using binders by the method of continuous briquetting of wet multicomponent compositions

В зависимости от состава, морфологического состояния и влажности поступающих на переработку отходов, а также с учетом их приоритетного соотношения в подготавливаемой брикетируемой смеси применяется наиболее технически простая и экономически оправданная система получения необходимой влажности смешиваемых компонентов смеси. Влажность после процесса подготовки – наиболее ответственный технологический цикл, обеспечивающий в дальнейшем максимальную производительность оборудования брикетирования и формирование статичного влажного каркаса топлива, поступающего на сушку. При этом добавление связующего компонента или вещества при влажном брикетировании является обязательным в силу того, что с их участием решается много технологических задач, основные из которых:

- интенсивность адсорбции связующего вещества с брикетируемыми частицами с образованием на поверхности тонкой пленки связующего;
- качественное формирование поверхности, формы, плотности и необходимых типоразмеров брикетов;
- возможность регулирования теплоты сгорания (с использованием нефтесодержащих

компонентов, органических и комбинированных связующих веществ);

- создание необходимой интенсивности застывания и прочности брикета при сушке или охлаждении.

В статье в основном рассказано об использовании в качестве связующего компонента преимущественно вязких отходов нефтепродуктов (нефтешламы, отработанные нефтепродукты, нефтесодержащие шламы очистных сооружений, донные отложения мазутных резервуаров и т. п.). Однако в случае их отсутствия (окончания) в процессе создания таких производств тот же эффект соединения частиц сыпучих отходов на разработанной установке достигается за счет использования иных связующих добавок (органического, неорганического происхождения, полученные комбинированными соединениями, в том числе из отходов).

Разработанные к настоящему времени многокомпонентные составы твердого MSF-топлива с применением различных отходов обеспечивают полное сжигание используемых в нем горючих материалов с выделением заданных теплотехнических характеристик. При этом удовлетворяются требования транспортировки и хра-

нения, обеспечивая сохранение свойств и качественных характеристик горючей массы [2].

Особенности подготовки и применения компонентов

На примере использования отходов деревообрабатывающей промышленности (опилки, стружка, пыль) и различных нефтесодержащих производственных отходов рассмотрим технологический процесс брикетирования многокомпонентных составов, включающий следующие этапы: подготовку отходов, измельчение материала до гранулометрического размера частиц (0,1–8,0 мм), дозирование компонентов и перемешивание, брикетирование массы, сушку в естественных условиях или сушильной камере.

Работа технологического оборудования в основном комплексе опытно-промышленной установки выполняется в такой последовательности: из расходного бункера-смесителя предварительно подготовленная смесь поступает в шнековый пресс, где уплотняется, затем перемещается через коническую формующую насадку, где при давлении 20 МПа брикетируется и передается на сушку. Получение многокомпонентного топлива с необходимыми энергетическими характеристиками и оптимальными экологическими выбросами при сжигании топлива характеризуется соблюдением следующих соотношений используемых сырьевых и связующих компонентов:

- основное сырье – отходы деревообработки и/или сельскохозяйственные отходы (солома, коistra и т. п.) массовой долей не менее 70 %;
- связующее сырье в виде углеводородсодержащих вязких отходов (нефтешламы, отработанные нефтепродукты, донные отложения мазутных резервуаров и т. п.) – не более 30 %;
- добавки (при необходимости) – промасленная ветошь или сорбенты, насыщенные нефтепродуктами (материал сорбента – торф, моx, лигнин и т. п.) – не более 5 % [3].

Изменяя насадку матрицы-фильтры на установке, можно производить гранулированное топливо диаметром от 14 мм, кусковое топливо различных типоразмеров (как правило, от 25 мм) и брикеты разных типоразмеров (50–150, 50–600 мм) и форм (круглые, квадратные, прямоугольные, шестигранные, квадратные со скругленными краями и т. п.) [4].

В составе линии подготовки к брикетированию при необходимости применяется устройство электрогидравлической обработки (ЭГО) нефте-

содержащих отходов, позволяющее уменьшать количество серы в используемых отходах, что в целом дает возможность регулировать и обеспечивать допустимое содержание серы в физико-химическом составе производимого топлива на экологически необходимом уровне. Внешний вид установки, преобразующей энергию в импульсы тока микросекундной длительности для электрогидравлической обработки нефтесодержащих отходов, представлен на рис. 3.

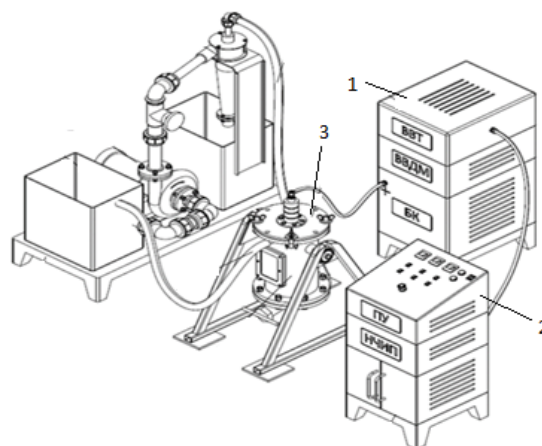


Рис. 3. Схема устройства электрогидравлической установки для обработки нефтесодержащих отходов

Fig. 3. Scheme of an electro-hydraulic unit for processing oil-containing waste

Сущность работы устройства подготовки (при необходимости) углеводородсодержащих отходов состоит в том, что во влажной среде нефтесодержащих отходов создается сверхвысокое импульсное гидравлическое давление, а гидродинамические эффекты приводят к появлению ударных волн со звуковой и сверхзвуковой скоростями, которые формирует блок высоковольтного трансформатора 1, имеющего в составе высоковольтный диодный мост и батареи накопительных конденсаторов, управляемые с помощью блока пульта управления 2, оборудованного низковольтной частью источника питания. В реакторе 3 в результате специально сформированного импульсного (искрового, кистевого) высоковольтного электрического разряда между электродами создаются мощные импульсно возникающие кавитационные процессы, которые в зависимости от регулируемой оператором продолжительности, частоты и мощности разрядов запускают механические резонансные явления с амплитудами, позволяющими осуществлять взаимное разделение (деэмульгирование, диспергирование и т. п.) или эмульгирование материалов. При этом электрогидравлическая обработка отходов сопровождается широким

комплексом физических и химических явлений (инфра- и ультразвуковые излучения, интенсивные импульсные световые, тепловые, ультрафиолетовые излучения; многократная ионизация соединений и элементов, содержащихся в жидкости), позволяющих, например, уменьшать содержание серы и других химических соединений, влияющих на формирование выбросов при сжигании топлива с использованием нефтесодержащих компонентов [5]. Подготовленная смесь характеризуется влажностью не менее 42–45 % и долей нефтесодержащих веществ в смеси, определяемой в зависимости от используемых видов углеводородсодержащих отходов, а также с учетом необходимых теплотехнических свойств.

На рис. 4 представлена зависимость производительности P от влажности w и доли нефтешламов x согласно полученному уравнению регрессии в виде поверхности в трехмерной системе координат [6].

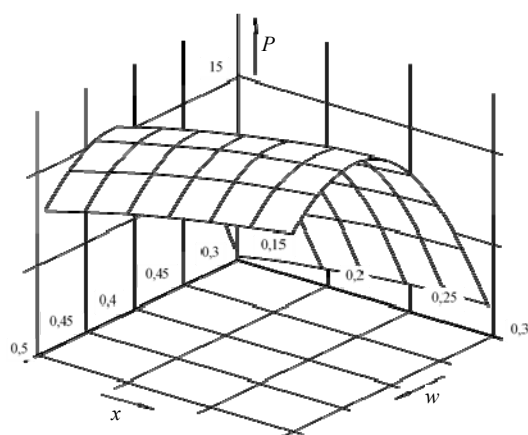


Рис. 4. Зависимость производительности от влажности и доли нефтешламов

Fig. 4. Dependence of productivity on humidity and proportion of oil sludge

В процессе брикетирования на выходе из рабочего канала матрицы температура брикета повышается на величину $\Delta T = (10\text{--}15)^\circ\text{C}$, что, с одной стороны, обеспечивает и с запасом удовлетворяет требованиям пожаробезопасности применения нефтесодержащих отходов. С другой – небольшое повышение температуры способствует ускорению сушки сформованных брикетов, а использование нефтесодержащих отходов в составе топлива допускается к применению Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь согласно ТКП 17.11-01–2009 [7].

Влажность смеси в разработанной установке играет важную роль и, как видно из полу-

ченной зависимости, она в первую очередь влияет на производительность работы брикетировочного оборудования. Так, при влажности менее 30 % брикетируемая масса не формируется при рабочих параметрах шнекового пресса. По мере роста влажности смеси производительность сначала растет, достигает максимума, а затем уменьшается. Причем при влажности более 60 % формируемая масса становится пастообразной, что не позволяет получать полноценный удерживающий заданную форму каркас брикета, пригодный для транспортировки и сушки [8].

Многообразие физико-химических и структурно-реологических процессов, которые протекают в период формирования структурного каркаса брикета, обусловлено большим количеством факторов. Влияние каждого из них оказывает воздействие на интенсивность адгезионных взаимодействий как во время подготовки смеси, так и при ее брикетировании [9, 10].

Исследование эксплуатационных характеристик

Среди основных факторов, оказывающих существенное структурообразующее действие, как показали проведенные исследования различных составов многокомпонентного твердого топлива, прежде всего, следует учитывать гранулометрический состав, активность поверхности, влажность брикетируемых компонентов, условия и пропорции смешивания компонентов, давление брикетирования. Гранулометрический состав определяется суммарной поверхностью соприкосновения брикетируемых частиц, числом и величиной пустот в структурном каркасе топлива, содержанием остроугольных частиц, рельефом их поверхности и обязательным наличием в составе пылевидных частиц [6].

Также стоит отметить, что непосредственное использование нефтесодержащих отходов выполняет ряд функций, в первую очередь является связующим компонентом при производстве этого вида топлива, во вторую – увеличивает до необходимого (задаваемого) уровня теплотехнические характеристики получаемого топлива, а при высыхании нефтесодержащие отходы обеспечивают гидрофобными свойствами получаемое топливо. На рис. 5 представлены исследования гидрофобных свойств путем полного погружения в воду различных видов твердого топлива.

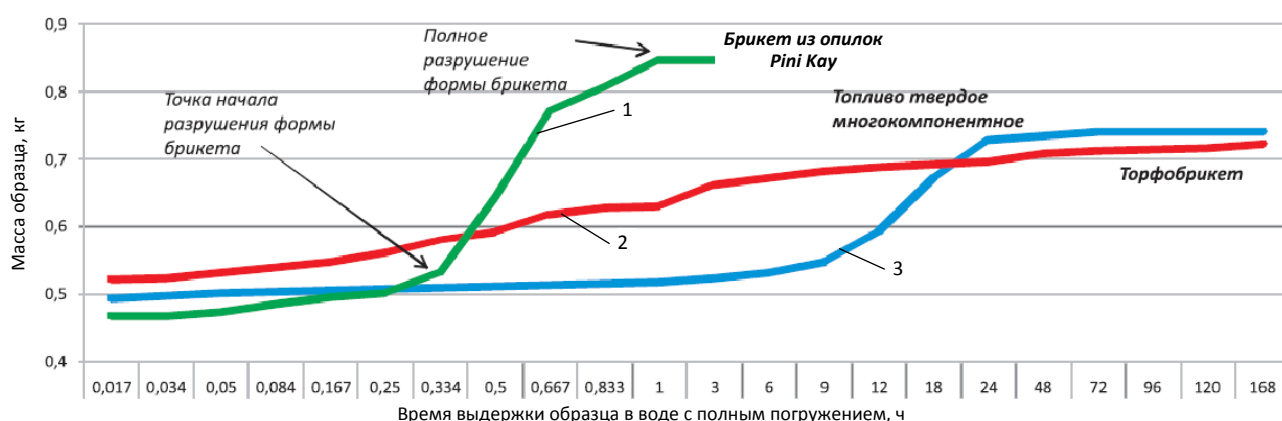


Рис. 5. График изменения массы различных видов топлива, погруженных в воду:
1 – брикеты из опилок Pini Kay; 2 – торфобрикет; 3 – многокомпонентное твердое топливо MSF

Fig. 5. Graph of changes in the mass of various fuels submerged in water:
1 – sawdust briquettes Pini Kay; 2 – peat briquette; 3 – multicomponent solid fuel

Использование нефтесодержащих горючих отходов в технологиях брикетирования решает ряд комплексных задач, в том числе вопросы их комбинированной утилизации, а также складирования и транспортировки продукции без пыления и проливов.

Проведенные исследования характеристик составов топлива и инструментальные замеры выбросов вредных веществ при сжигании топлив с использованием наиболее распространенных видов отходов, образующихся на предприятиях промышленности, объективно показывают перспективность внедрения технологий получения MSF-топлива.

Актуальность решения проблем переработки горючих отходов с использованием доступных технологий подтверждается возросшим интересом к разработанной технологии и технологическому оборудованию не только в Республике Беларусь, но и во многих странах Европы и Азии, где проведен ряд экспериментальных и теоретических исследований [11].

ВЫВОДЫ

1. Технология изготовления многокомпонентного твердого топлива методом брикетирования дает возможность применять широкий спектр малоиспользуемых горючих отходов в качестве твердого топлива с возможностью их сжигания в различных теплогенерирующих устройствах.

2. Разработанная технология позволяет в промышленных объемах производить много-

компонентное твердое топливо с заданными техническими и энергетическими характеристиками, что в целом способствует улучшению экологической обстановки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беларусь 2030: государство, бизнес, наука, образование: матер. 2-й Междунар. науч. конф., 29 мая 2015 г., г. Минск / Белорусский государственный университет. Минск: Право и экономика, 2015. 146 с.
2. Хрусталева, Б. М. Многокомпонентное твердое топливо на основе малоиспользуемых отходов / Б. М. Хрусталева, А. Н. Пехота // Энергетика и ТЭК. 2011. № 11. С. 16–19.
3. Хрусталева, Б. М. Энергоэффективное многокомпонентное твердое топливо на основе малоиспользуемых отходов / Б. М. Хрусталева, А. Н. Пехота // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 11 Междунар. науч.-техн. конф.: в 4-х т. Минск, БНТУ, 2013. Т. 1. С. 146.
4. Хрусталева, Б. М. Композиционное твердое топливо на основе вторичных горючих отходов / Б. М. Хрусталева, А. Н. Пехота // Энергоэффективность. 2016. № 4. С. 18–22.
5. Юткин, Л. А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности / Л. А. Юткин. Л.: Машиностроение, 1986. 253 с.
6. Хрусталева, Б. М. Технология эффективного использования углеводородсодержащих отходов в производстве многокомпонентного твердого топлива / Б. М. Хрусталева, А. Н. Пехота // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 2. С. 122–140.
7. Охрана окружающей среды и природопользование. Отходы. Правила использования углеводородсодержащих отходов в качестве топлива: ТКП 17.11-01-2009. Введ. 01.04.2009 (изм. 01.10.20103, 01.01.2013). Минск: РУП «Бел НИЦ «Экология», 2013. 28 с.

8. Способ получения топлива твердого многокомпонентного: пат. 18408 Респ. Беларусь, МПК С 10 L 5/48, С 10 L 5/06, С 10 L 5/36 / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталеv. Оpubл. 30.08.14.
9. Состав для брикетирования топлива многокомпонентного: пат. 18463 Респ. Беларусь МПК С 10 L 5/04, С 10 L 5/48 / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталеv. Оpubл. 30.08.14.
10. Состав для брикетирования топлива многокомпонентного: пат. 18130 Респ. Беларусь МПК С 10 L 5/44, С 10 L 5/48 / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталеv. Оpubл. 30.04.14.
11. Перспективные научно-технические разработки и инновационное развитие регионов: Каталог инновационных разработок – 2020 / Государственный комитет по науке и технологиям Республики Беларусь, Гомельский областной исполнительный комитет. Гомель: Центр научно-технической и деловой информации, 2020. С. 48–52.

Поступила 15.09.2020

Подписана в печать 20.11.2020

Опубликована онлайн 29.01.2021

REFERENCES

1. Belarusian State University (2015) *Belarus' 2030: Gosudarstvo, Biznes, Nauka, Obrazovanie: Mater. 2-i Mezhdunar. Nauch. Konf., 29 Maya 2015 g., g. Minsk* [Belarus in 2030: The State, Business, Science, Education: Mat. 2nd International Scientific Conference (May 29, 2015, Minsk)]. Minsk, Pravo i Ekonomika Publ. 146 (in Russian).
2. Khroustalev B. M., Pekhota A. N. (2011) Multicomponent Solid Fuel Based on Low-Utilized Waste. *Energetika i TEK* [Energy and Fuel and Energy Complex], (11), 16–19 (in Russian).
3. Khroustalev B. M., Pekhota A. N. (2013) Energy-Efficient Multicomponent Solid Fuel Based on Low-Used Waste. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Materialy 11 Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 1* [Science to Education, Industry, Economics. Proceedings of 11th International Science and Technical Conference. Vol. 1]. Minsk, Belarusian National Technical University, 146 (in Russian).
4. Khroustalev B. M., Pekhota A. N. (2016) Composite Solid Fuel Based on Secondary Combustible Waste. *Energo-effektivnost'* [Energy Efficiency], (4), 18–22 (in Russian).
5. Yutkin L. A. (1986) *Electro-Hydraulic Effect and its Application in Industry*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1986. 253 (in Russian).
6. Khroustalev B. M., Pekhota A. N. (2016) Technology for Efficient Usage of Hydrocarbon-Containing Waste in Production of Multicomponent Solid Fuel. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (2), 122–140. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-2-122-140> (in Russian).
7. TKP [Technical Code of Common Practice] 17.11-01–2009. *Environmental Protection and Nature Management. Waste. Rules for the Use of Hydrocarbon Waste as Fuel*. Minsk, Publishing House of RUE “Bel NITs “Ekologiya”, 2013. 28 (in Russian).
8. Pekhota A. N., Khroustalev B. M. (2014) *Method for Producing Multicomponent Solid Fuel*. Patent Republic of Belarus No 18408 (in Russian).
9. Pekhota A. N., Khroustalev B. M. (2014) *Composition for Briquetting Multicomponent Fuel*. Patent Republic of Belarus No 18463 (in Russian).
10. Pekhota A. N., Khroustalev B. M. (2014) *Composition for Briquetting Multi-Component Fuel*. Patent Republic of Belarus No 18130 (in Russian).
11. State Committee for Science and Technology of the Republic of Belarus, Gomel Regional Executive Committee (2020) *Promising Scientific and Technical Developments and Innovative Development of Regions: Catalog of Innovative Developments – 2020*. Gomel, Center for Scientific, Technical and Business Information, 48–52 (in Russian).

Received: 15.09.2020

Accepted: 20.11.2020

Published online: 29.01.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-66-74>

УДК 69.003.13

Внедрение цифрового управления проектами строительства и эксплуатации энергоэффективных жилых домов

Доктора экон. наук, профессора В. П. Грахов¹⁾, А. Л. Кузнецов¹⁾,
канд. пед. наук, доц. Ю. Г. Кислякова¹⁾, У. Ф. Симакова¹⁾, асп. Я. О. Князева¹⁾

¹⁾Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова (Ижевск, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Рассмотрен вопрос о переходе на цифровые технологии управления в сфере строительства и жилищно-коммунального хозяйства в России, а также в других странах. Разработана оптимизационная методика применения цифровой экономики на примере существующей системы управления недвижимостью – в микрорайоне «Столичный» города Ижевска (Удмуртская Республика, Российская Федерация). Описаны существующие и разработаны новые проекты цифровых технологий, внедрение которых повысит эффективность реализации строительства и эксплуатации жилых домов. Сформирована методика создания оптимизационной математической модели управления проектами строительства и эксплуатации энергоэффективных жилых домов. Даны предпосылки и схема совместного внедрения данной модели и цифровых технологий для улучшения качества строительства и эксплуатации жилых домов. В рамках национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» предложена поэтапная методика внедрения цифровых технологий в градостроительную деятельность, а также в сферу жилищно-коммунального хозяйства. Рассмотрены преимущества использования технологии блокчейн в управлении проектами строительства и эксплуатации энергоэффективных жилых домов. Применение разработанных методик, удовлетворяющих запросам участников строительной деятельности и сферы жилищно-коммунального хозяйства, позволит повысить эффективность не только системы управления строительством и эксплуатацией энергоэффективных жилых домов, но и общую эффективность внедрения цифрового управления в сферу недвижимости. Предложенное программное обеспечение «АБРИС» может использоваться в жилищно-коммунальном хозяйстве для оптимизации и отслеживания расхода ресурсов, жизненно необходимых для комфортного проживания населения.

Ключевые слова: цифровая экономика, жилищно-коммунальное хозяйство, строительство, цифровизация, энергоэффективные жилые дома, цифровые технологии, управление эксплуатацией жилых зданий, BIM-технологии, облачные технологии, программное обеспечение «АБРИС»

Для цитирования: Внедрение цифрового управления проектами строительства и эксплуатации энергоэффективных жилых домов / В. П. Грахов [и др.] // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 1. С. 66–74. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-66-74>

Implementation of Digital Project Management for Construction and Operation of Energy-Efficient Residential Buildings

V. P. Grakhov¹⁾, A. L. Kuznecov¹⁾, Yu. G. Kislyakova¹⁾, U. F. Simakova¹⁾, Y. O. Knyazeva¹⁾

¹⁾Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russian Federation)

Abstract. The paper considers an issue of transition to digital management technologies in the field of construction and housing and communal services in Russia, as well as in other countries. An optimization methodology for the application of the digital economy has been developed using the example of the existing real estate management system in the Stolichny

Адрес для переписки
Грахов Валерий Павлович
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова
ул. Студенческая, 42,
426069, г. Ижевск, Российская Федерация
Тел.: +7 3412 77-20-22
rector@istu.ru

Address for correspondence
Grakhov Valerii P.
Kalashnikov Izhevsk State
Technical University
42, Studencheskaya str.,
426069, Izhevsk, Russian Federation
Tel.: +7 3412 77-20-22
rector@istu.ru

Microdistrict of Izhevsk city (Udmurt Republic, Russian Federation). The existing and developed new projects of digital technologies are described, the introduction of which will increase the efficiency of the construction and operation of residential buildings. A methodology has been formed for creating an optimization mathematical model for managing construction and operation projects of energy-efficient residential buildings. Prerequisites and a scheme for the joint implementation of this model and digital technologies are given to improve the quality of construction and operation of residential buildings. The paper proposes a phased methodology for the introduction of digital technologies in urban planning, as well as in the field of housing and communal services within the framework of the national program "Digital Economy of the Russian Federation". The advantages of using block-chain technology in the management of projects for the construction and operation of energy-efficient residential buildings have been studied in the paper. The application of the developed methods that meet the needs of participants in construction activities, as well as the housing and utilities sector, will improve the efficiency of not only the management system for the construction and operation of energy-efficient residential buildings, but also the overall effectiveness of the introduction of digital management in real estate. The proposed ABRIS software can be used in housing and communal services to optimize and track the expenditure of resources vital for a comfortable living of the population.

Keywords: digital economy, housing and communal services, construction, digitalization, energy-efficient residential buildings, digital technologies, management of residential building operation, BIM-technologies, cloud technologies, ABRIS software

For citation: Grakhov V. P., Kuznecov A. L., Kislyakova Yu. G., Simakova U. F., Knyazeva Y. O. (2021) Implementation of Digital Project Management for Construction and Operation of Energy-Efficient Residential Buildings. *Science and Technique*. 20 (1), 66–74. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-66-74> (in Russian)

Введение

В современной рыночной ситуации цифровая трансформация всех отраслей экономики, в том числе сферы жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ), неизбежна. Для этого единым цифровым пространством должны быть охвачены все партнеры и участники определенного вида деятельности.

Сегодня «умные» технологии в строительстве и эксплуатации жилых домов – это грамотное вложение денежных средств, снижающее расходы на проживание, а также экономящее финансы при использовании различных инженерных систем, повышающих комфорт проживания и сокращающих затраты на управление всеми возможностями жилого дома.

В ближайшие десять лет одно из основных направлений национальной политики – создание и развитие цифровой экономики. Разумеется, внедрение инноваций затронет абсолютно все сектора экономики. Даже если рассматривать только отрасль строительства и сферу коммунального хозяйства, то переход на цифровые технологии управления – это уже новые возможности [1].

На основе анализа мирового опыта применения цифровых технологий в строительстве и сфере ЖКХ можно сделать вывод, что в странах, лидирующих по уровню использования таких технологий, наблюдается эффективность их внедрения в количественных и качественных

значениях. Таким образом, путем применения информационных сервисов в данных областях можно добиться роста прибыли, повышения производительности, показателей рентабельности, сокращения производимых затрат [2].

В исследовании авторы статьи использовали компьютерную модель жилого микрорайона «Столичный» в городе Ижевске (Удмуртская Республика, Российская Федерация), которая представлена в виде структуры системы управления жилищно-коммунальным хозяйством микрорайона, а также технологической схемой процессов управления. Это дает возможность опробовать различные принципы внедрения цифровых технологий в управление эксплуатацией жилых зданий.

В строительной сфере ведущих стран мира внедрение технологий информационного моделирования Building Information Modeling (BIM) происходит активно и достаточно масштабно. Это объясняется выгодами, которые приобретаются на разных этапах реализации проекта и на различных уровнях – государства, отрасли, отдельного предприятия [3].

Цифровая экономика в управлении проектами строительства

Жилищно-коммунальное хозяйство – одна из наиболее влиятельных сфер, где внедрению ин-

формационных технологий принадлежит главная роль в развитии всей отрасли. Здесь под воздействием современных и вновь появляющихся цифровых информационных технологий происходят существенные изменения в управлении и эксплуатации [4].

На рис. 1 представлена классификация моделей управления многоквартирными жилыми домами (МКД), действующих сегодня на территории Российской Федерации.

С каждым годом все большая часть населения предпочитает использовать дополнительные информационные сервисы, где возможно напрямую задавать вопросы руководителям городских управлений, управляющих компаний, товариществ собственников жилья (ТСЖ). Следовательно, одной из наиболее важных задач развития сферы ЖКХ является создание многофункциональных информационных сервисов, позволяющих жителям быстро и без проблем получить ту или иную услугу [6].

Приведем сильные и слабые стороны каждой из моделей управления МКД (табл. 1).

Оценка показателей сильных и слабых сторон действующих в настоящее время моделей управления МКД представлена в табл. 2.



Рис. 1. Классификация моделей управления многоквартирными жилыми домами [5]

Fig. 1. Classification of apartment building management models [5]

Проанализировав сильные и слабые стороны конкурентов, отметим, что основным недостатком систем управления МКД с применением искусственного интеллекта является высокая стоимость автоматизации системы, поскольку для этого необходимо заново создавать платформу для работы. Сильные стороны таких систем – «прозрачность» расчетов коммунальных услуг, а также иных правовых документов, необходимых для функционирования системы ЖКХ, и безопасность сетей данных, что гарантирует невозможность перезаписи.

Таблица 1

Сильные и слабые стороны моделей управления многоквартирными жилыми домами

Advantages and disadvantages of apartment building management models

Наименование модели управления многоквартирными жилыми домами	Характеристика модели управления	Стороны модели управления	
		Сильные	Слабые
1	2	3	4
Классическая	Автоматизация рабочего места технических специалистов для удобства расчета и ведения дел управляющих компаний и ТСЖ	Небольшая цена. Легкое техническое обслуживание сети. Присутствует управляющий орган, ответственный за развитие технологии. Среднее потребление количества электроэнергии	Непрозрачность бизнеса. Необходимость в посредниках при транзакциях. Нет гарантии безопасности сети данных. Расходы на администрирование сетей. Недоступность к сети данных в любое время. Нет возможности создания общей электронной базы данных. Плохая адаптация как технических специалистов, так и жильцов МКД

Окончание табл. 1

1	2	3	4
На базе облачных инновационных технологий	Для региональных и муниципальных органов власти, управляющих организаций, расчетно-кассовых центров. Основная цель – удобство работы с абонентами	Легкое техническое обслуживание сети данных. Присутствует управляющий орган, ответственный за развитие технологии. Легкая адаптация как технических специалистов, так и жильцов МКД. Доступность к сети данных в любое время. Создание общей электронной базы данных. Легкая адаптация жильцов МКД. Отсутствие необходимости в посредниках при транзакциях	Непрозрачность бизнеса. Нет гарантии безопасности сети данных. Расходы на администрирование сетей. Необходимость создания серверов для хранения данных. Дороговизна внедрения. Плохая адаптация технических специалистов. Потребление большого количества электроэнергии
С применением искусственного интеллекта	ПО «АБРИС» тесно связано с технологией «Умный дом», а именно: информация, собранная с различных по специфике работы специальных датчиков технологии «Умный дом», установленных в жилых зданиях для сбора информации, будет формироваться в независимую базу данных в рамках технологии блокчейн	Безопасность сетей данных. Снижение накладных расходов на администрирование сетей. Возможность фиксации времени размещения любых документов. Отсутствие необходимости в посредниках при транзакциях. Прозрачность бизнеса. Нет необходимости создания серверов	Дороговизна внедрения. Плохая адаптация технических специалистов. Отсутствие управляющего органа, ответственного за развитие технологии. Потребление большого количества электроэнергии

Таблица 2

Оценка показателей конкурентоспособности моделей управления многоквартирными жилыми домами

Assessment of competitiveness indicators of apartment building management models

Решающий фактор	Оценка показателя						
	–3	–2	–1	0	1	2	3
Стоимость автоматизации		■	▶		●		
Адаптация к системе автоматизации						■	
Техническое оборудование для использования системы			●		▶		
Безопасность сетей данных	●		▶				■
«Прозрачность» расчетов	●			▶			■

Условные обозначения: ● – классические системы управления МКД; ▶ – модель управления МКД с применением облачных инновационных технологий; ■ – модель управления МКД с применением искусственного интеллекта.

Инновационные методы в сфере использования энергоресурсов – это ключ к решению проблемы нерационального их применения в процессе строительства и эксплуатации зданий. Для оптимизации параметров энергоэффективности сооружений необходимо сосредоточиться на разработке методологий измерений и принципах организации цифровых систем зданий [7].

Модель управления строительством жилого дома и взаимосвязь в ней участников строительства показаны на рис. 2.

Рассмотрим модель управления строительством и эксплуатацией жилых домов на примере микрорайона «Столичный» Ижевска. Микрорайон «Столичный» – это участок земли площадью 93,7 га, высота зданий – от 10 до 25 этажей, общая площадь квартир – 650 тыс. м², что может обеспечить проживание около 25,5 тыс. человек.

В микрорайоне действует одна управляющая компания ЖКУ № 826 ФГУП «ГВСУ № 8». Представим систему управления многоквартирным жилищным фондом как трехуровневую (рис. 3).



Рис. 2. Модель управления строительством многоквартирного жилого дома

Fig. 2. Multi-apartment residential construction management model

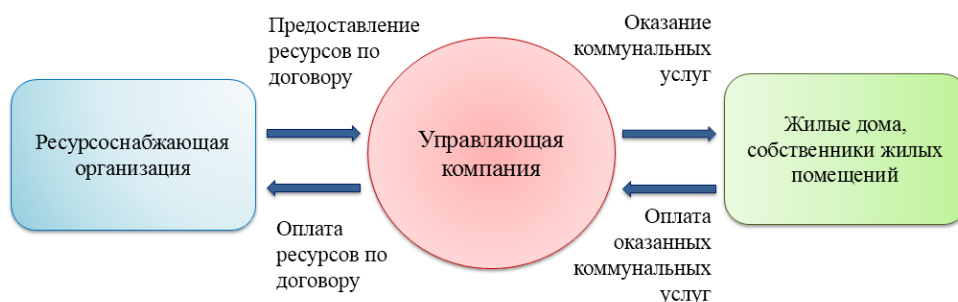


Рис. 3. Модель управления жилищным фондом управляющей компанией

Fig. 3. Housing management model of management company

При управлении строительным объектом с использованием BIM-технологий появляется возможность объединения информационной модели сооружения на этапе реализации проекта, плановых и фактических показателей. Кроме того, в режиме реального времени можно контролировать настоящую картину состояния объектов строительства и получать управленческую информацию.

Для качественного выполнения данных функций к технологиям информационного моделирования необходимо создавать дополнительные технологии, программные продукты, чтобы развивать и повышать их потенциал в строительстве и эксплуатации жилых домов.

Программа «АБРИС» будет использоваться в сфере ЖКХ для оптимизации и отслеживания расхода ресурсов, жизненно необходимых для

комфортного проживания населения. Применение «АБРИС» позволяет добиться таких преимуществ, как:

- внедрение автоматизированных систем сбора данных на основе искусственного интеллекта, позволяющих наблюдать, корректировать, а также поддерживать жилые дома в надлежащем для проживания состоянии;
- защита информации за счет применения технологии блокчейн – так собранная информация хранится на множестве компьютеров одновременно, что не позволяет ее повредить;
- экономия времени и денежных средств;
- финансовая составляющая – уменьшение затрат на электроэнергию, что актуально при постоянно растущих тарифах.

Для создания программного обеспечения «АБРИС» привлечена технология блокчейн. Блокчейн – распределенная база данных, у ко-

торой устройства хранения данных не подключены к общему серверу [8]. Эта база хранит постоянно растущий список упорядоченных записей, называемых блоками. Каждый блок содержит метку времени и ссылку на предыдущий блок.

Главные преимущества использования блокчейна – прозрачность проводимых операций и копирование этих операций таким образом, что у всех участников процесса всегда есть оперативная информация о каждом шаге партнеров. Но при этом у участников разный доступ к данным файлам [9].

Программа «АБРИС» связана с технологией «Умный дом» таким образом, что информация, собранная с различных по специфике работы специальных датчиков технологии «Умный дом», установленных в жилых зданиях для сбора информации, будет формироваться в независимую базу данных в рамках технологии блокчейн. Следовательно, такая база позволяет решить проблему непрозрачности начисления платы за коммунальные услуги: «АБРИС» позволит наблюдать за начислениями платы даже со смартфонов с помощью специального программного обеспечения.

Создание оптимизационной методики применения цифровой экономики в управлении недвижимостью

Основная задача построения оптимизационных моделей управления заключается в нахождении экстремума функций при заданных ограни-

чениях в виде систем уравнений и неравенств. Благодаря использованию этих моделей можно найти решения по повышению эффективности деятельности такого хозяйствующего субъекта.

Оптимизационные модели управления предназначены для выявления наилучшего решения при соблюдении заранее заданных, определенных и конкретизированных условий и ограничений. Методика создания оптимизационной модели управления, как фактора повышения эффективности деятельности современного хозяйствующего субъекта, представлена на рис. 4.

Определим цель оптимизации модели управления деятельностью управляющей компании, как улучшение показателей моделируемой системы деятельности управляющей компании, путем подбора – выбора некоторых параметров системы. Параметрами системы обозначим повышение эффективности деятельности управляющей компании. За критерий оптимизации примем функцию $F(x)$ и назовем ее функцией повышения эффективности деятельности управляющей компании, как деятельности современного хозяйствующего субъекта, которая будет являться целевой функцией [10].

Зависимость оптимизируемого показателя от отдельных параметров x , значения которых можно изменять, выражает целевая функция. Такие параметры называются управляемыми

$$x_{i,j} = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

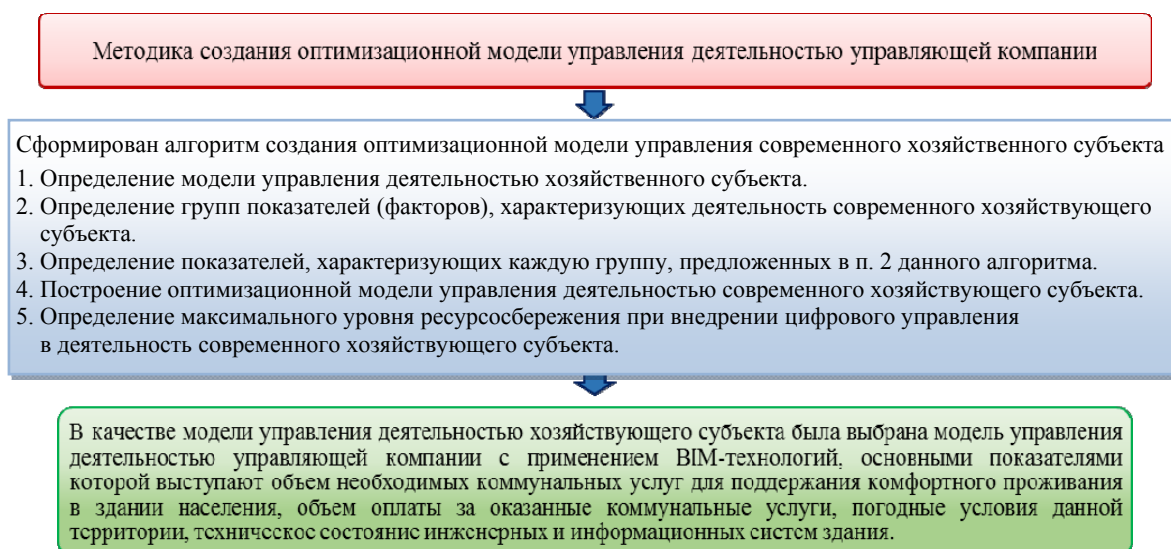


Рис. 4. Методика создания оптимизационной модели

Fig. 4. Methodology for creating optimization model

Управляемые параметры x_i независимы друг от друга и могут изменяться в существующих пределах допустимой области D_x в процессе оптимизации.

Аналитически область допустимых значений может задаваться в виде набора функций

$$\varphi k(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0. \quad (2)$$

Сформулируем задачу оптимизации в общем виде: с учетом ограничений на управляемые переменные минимизировать либо максимизировать целевую функцию.

Под минимизацией или максимизацией функции n переменных на заданном множестве D_x будем считать определение самого высокого минимума либо максимума этой функции

$$F(x) = F(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (3)$$

Поскольку минимизация целевой функции эквивалентна максимизации противоположной величины, рассмотрим максимизацию целевой функции

$$F(x) \rightarrow \max. \quad (4)$$

Рассмотрим повышение эффективности деятельности управляющей компании как функцию, зависящую от объема необходимых коммунальных услуг для поддержания комфортного проживания в здании населения (x_1), от объема оплаты за оказанные коммунальные услуги (вовлеченность населения в деятельность управляющей компании) (x_2), погодных условий данной территории (x_3), от техническо-

го состояния инженерных и информационных систем здания (x_4). Таким образом, функцию ресурсосбережения при хозяйственной деятельности управляющей компании можно представить в виде

$$F(x) = F(x_1, x_2, x_3, x_4). \quad (5)$$

Определим область D_x как функцию ограничений в виде

$$B(x) = B(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (6)$$

где B – компьютерная модель комплекса зданий, созданная на основе BIM-технологий.

Таким образом, оптимизационная модель, приводящая к максимизации ресурсосбережения хозяйственной деятельности управляющей компании, будет иметь следующий вид:

$$F(x) = F(x_1, x_2, x_3, x_4) \rightarrow \max$$

при $B(x) = \varphi k(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0. \quad (7)$

В случае точного определения условий, при которых действует данная экономико-математическая модель, ее оптимизация с помощью построения оптимизационной модели приводит к эффективной работе всей системы, а именно – к повышению эффективности улучшенных процессов деятельности управляющей компании, совмеща в себе все достижения передовых цифровых технологий. Схема предполагаемой совместной работы оптимизационной модели и цифровых технологий показана на рис. 5.



Рис. 5. Схема совместной работы оптимизационной модели и цифровых технологий

Fig. 5. Collaboration scheme of optimization model and digital technologies

Внедрение системы «Умный дом» с целью энергосбережения эффективно при правильном выборе качественных показателей. Если учесть определения коэффициента учета качественных показателей и относительно длительный срок окупаемости системы, то можно сделать вывод, что чем больше применено функций в системе «Умный дом», тем больше будет годовой экономический эффект от внедрения.

ВЫВОДЫ

1. Инновационные методы в сфере использования энергоресурсов – это ключ к решению проблемы нерационального их применения в процессе строительства и эксплуатации зданий. Для оптимизации параметров энергоэффективности сооружений необходимо сосредоточиться на разработке методологий измерений и принципах организации цифровых систем зданий [11].

2. Как и любой другой процесс, внедрение цифровых технологий проходит ряд последовательных стадий. Управление данным процессом помогает четко понять последовательность реализации внедрения и для каждого этапа определить цели и задачи.

3. Предложенное программное обеспечение «АБРИС» может использоваться в сфере жилищно-коммунального хозяйства с целью оптимизации и отслеживания расхода ресурсов, жизненно необходимых для комфортного проживания населения. Применение «АБРИС» позволит добиться таких преимуществ, как:

- внедрение автоматизированных систем сбора данных на основе искусственного интеллекта, позволяющих наблюдать, корректировать, а также поддерживать жилые дома в надлежащем для проживания состоянии;
- защита информации за счет применения технологии блокчейн – так собранная информация одновременно хранится на множестве компьютеров, что не позволяет ее повредить;
- экономия времени и денежных средств;
- финансовая составляющая – уменьшение затрат на электроэнергию, что актуально при постоянно растущих тарифах.

4. Для реального перехода к цифровым технологиям управления, в частности в сфере жилищно-коммунального хозяйства, необходимо:

- усилить:
 - роль государства в период интенсивного развития цифровой экономики, а также цифровизации сферы строительства и жилищно-коммунального хозяйства;
 - работу по развитию единого информационно-аналитического пространства в области мониторинга, контроля и надзора;
 - работу по использованию технологии блокчейн путем создания инфраструктуры для сбора и хранения информации;
- провести:
 - анализ и дать оценку потенциала и возможностей рынка жилищно-коммунального хозяйства;
 - работу, чтобы повысить готовность товариществ собственников жилья, управляющих компаний к внедрению и дальнейшему использованию цифровых технологий.

6. При переходе к цифровой модели наблюдаются новые качественные изменения социально-экономических отношений – это происходит и в бизнес-структурах, и в государстве. Процесс цифровизации несет в себе как новые возможности, так и новые проблемы. Например, по расчетам аналитиков компании Gartner, к 2025 г. цифровая трансформация коснется абсолютно всех сфер общества [12]. Для того чтобы внедрение цифровой экономики было эффективно, необходимо разработать единые для всех методики. Учитывая поставленные цели и задачи, оцениваются результаты, которые должны быть просчитаны с осознанием социально-экономической пользы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Осипов, С. Н. Некоторые особенности ресурсосбережения в строительстве / С. Н. Осипов, А. В. Захаренко, Д. А. Поздняков // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 2. С. 114–122. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-2-114-122>.
2. К вопросу развития жилищного строительства с минимальным потреблением энергоресурсов / Б. М. Хрусталев [и др.] // Энергетика. Известия высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2014. № 5. С. 45–60.
3. Sowing the Seeds of the Future: Policies for Financing Tomorrow's Innovations / L. Grillia [et al.] // Technological Forecasting and Social Change. 2018. Vol. 127. P. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.10.021>.

4. Горбачев, Д. В. Обзор современных информационных технологий автоматизации деятельности в сфере ЖКХ / Д. В. Горбачев, Э. Г. Хаимова // Молодой ученый. 2015. Т. 93, № 13. С. 33–35.
5. Оптимизационная модель деятельности управляющей компании / В. П. Грахов [и др.] // Вестник Челябинского государственного университета. Экономические науки. 2019. Т. 425, № 3. С. 168–177.
6. Куприяновский, В. П. BIM – цифровая экономика. Как достигли успеха? Практический подход к теоретической концепции. Часть I. Подходы и основные преимущества BIM / В. П. Куприяновский, С. А. Синягов, А. П. Добрынин // International Journal of Open Information Technologies. 2016. Т. 4, № 3. С. 1–8.
7. Грахов, В. П. Эффективность энергосберегающих мероприятий в жилищном строительстве / В. П. Грахов, С. А. Мохначев, В. Г. Егорова // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2. С. 273–275.
8. Volkonska, E. Блокчейн – что это понятным языком [Электронный ресурс] / E. Volkonska. Режим доступа: <http://bestinvestpro.com/blokchejn-chto-eto-ponyatnym-yazykom>. Дата доступа: 09.09.2019.
9. Kakavand, H. The Blockchain Revolution: an Analysis of Regulation and Technology Related to Distributed Ledger Technologies / H. Kakavand, N. Kost De Serves, B. Chilton. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2849251>.
10. Тептин, Г. М. Математическое моделирование / Г. М. Тептин, О. Г. Хуторова, А. А. Журавлев. Казань, 2009. 19 с.
11. Швайба, Д. Н. Системный анализ показателей социально-экономической безопасности / Д. Н. Швайба // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 4. С. 338–343. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-4-338-343>.
12. Ленчук, Е. Б. Формирование цифровой экономики в России: проблемы, риски, перспективы / Е. Б. Ленчук, Г. А. Власкин // Вестник Института экономики Российской академии наук. 2018. № 5. С. 9–21.
13. Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations, (5), 45–60 (in Russian).
14. Grilli L., Mazzucato M., Meoli M., Scellato G. (2018) Sowing the Seeds of the Future: Policies for Financing Tomorrow's Innovations. *Technological Forecasting and Social Change*, 127, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.10.021>.
15. Gorbachev D. V., Khakimova E. G. (2015) Overview of Modern Information Technologies for the Automation of Housing and Communal Services. *Molodoy Uchionyi [Young Scientist]*, 93 (13), 33–35 (in Russian).
16. Grakhov V. P., Kislyakova Yu. G., Simchenko O. L., Simakova U. F., Chazov E. L., Knyazeva Ya. O. (2019) Optimization Model of Management Company. *Vestnik Chelyabinskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Ekonomicheskie Nauki [Bulletin of Chelyabinsk State University. Economic Sciences]*, 425 (3), 168–177 (in Russian).
17. Kupriyanovskii V. P., Sinyagov S. A., Dobrynin A. P. (2016) BIM – Digital Economics. How Did you Succeed? Practical Approach to Theoretical Concept. Part I. Approaches and Key Benefits of BIM. *International Journal of Open Information Technologies*, 4 (3), 1–8 (in Russian).
18. Grakhov V. P., Mokhnachev S. A., Egorova V. G. (2015) Efficiency of Energy-Saving Measures in Housing. *Sovremennyye Problemy Nauki i Obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*, (2), 273–275 (in Russian).
19. Volkonska E. (2017) Blockchain – What it Means in Plain Language. Available at: <http://bestinvestpro.com/blokchejn-chto-eto-ponyatnym-yazykom>. (Accessed 9 September 2019) (in Russian).
20. Kakavand H., Kost De Serves N., Chilton B. (2016) The Blockchain Revolution: an Analysis of Regulation and Technology Related to Distributed Ledger Technologies. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2849251>.
21. Teptin G. M., Khutorova O. G., Zhuravlev A. A. (2009) *Mathematical Modeling*. Kazan. 19 (in Russian).
22. Shvaiba D. N. (2018) Systematic Analysis of Indicators for Socio-Economic Security. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 17 (4), 338–343 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-4-338-343>.
23. Lenchuk E. B., Vlaskin G. A. (2018) Formation of Digital Economy in Russia: Problems, Risks, Prospects. *Vestnik Instituta Ekonomiki Rossiyskoy Akademii Nauk = The Bulletin of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences*, (5), 9–21 (in Russian).

Поступила 17.12.2019

Подписана в печать 13.03.2020

Опубликована онлайн 29.01.2021

REFERENCES

1. Osipov S. N., Zakharenko A. V., Pozdnyakov D. A. (2018) Some Specific Features of Resource Saving in Construction. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 17 (2), 114–122 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-2-114-122>.
2. Khroustalev B. M., Pilipenko V. M., Danilevsky L. N., Nguyen T. (2014) On Problem in Development of House Building Construction with Minimum Power Resources Consumption. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh*

Received: 17.12.2019

Accepted: 13.03.2020

Published online: 29.01.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-75-82>

УДК 338.45

Методический инструментарий оценки эффективности проектов капитального строительства нефтедобывающих предприятий

Асп. Е. Л. Чазов¹⁾, докт. экон. наук, проф. В. П. Грахов¹⁾, О. Л. Симченко¹⁾

¹⁾Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова (Ижевск, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Ввиду того что большинство крупных нефтяных месторождений России, характеризующихся высокой себестоимостью добываемой продукции, находятся на заключительной стадии разработки, в последние годы вопрос оптимизации затрат приобретает все большее значение. Основные статьи затрат на предприятиях нефтегазового комплекса – проектирование и строительство (реконструкция) нефтепромысловых объектов. Анализ применяемых в настоящее время методов ранжирования нефтегазовых проектов показал, что все они по своей сути являются субъективными, так как основаны на экспертном мнении. Авторами разработан методический инструментарий оценки эффективности проектов капитального строительства нефтепромысловых объектов (на примере проведения строительных работ на площадке под инвентарные приемные мостки и подъемный агрегат), позволяющий максимально исключить влияние экспертного мнения и соответственно существенно повысить качество и обоснованность принимаемых управленческих решений. Выбор оптимального проекта осуществляется на основе двухуровневой оценки: технической (1-й этап) и экономической (2-й этап). При этом на каждом этапе расчетным путем по результатам анализа объективных данных и с помощью разработанных алгоритмов определяется интегральный показатель. Таким образом, можно судить об эффективности любого проекта, не основываясь на субъективном подходе в оценке с помощью экспертного мнения.

Ключевые слова: проект, техническая оценка, экономическая оценка, интегральный показатель, выбор проекта, двухуровневая оценка, расчет стоимости

Для цитирования: Чазов, Е. Л. Методический инструментарий оценки эффективности проектов капитального строительства нефтедобывающих предприятий / Е. Л. Чазов, В. П. Грахов, О. Л. Симченко // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 1. С. 75–82. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-75-82>

Methodological Tools for Evaluating Effectiveness of Capital Construction Projects of Oil Producing Enterprises

E. L. Chazov¹⁾, V. P. Grakhov¹⁾, O. L. Simchenko¹⁾

¹⁾Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russian Federation)

Abstract. Due to the fact that most of the large oil fields in Russia, characterized by high production costs, are at the final stage of development; the issue of cost optimization has become increasingly important in recent years. The main cost items at oil and gas enterprises are design and construction (reconstruction) of oil field facilities. Analysis of currently used methods for ranking oil and gas projects has shown that all of them are inherently subjective, since they are based on expert opinion. The authors have developed a methodological tools for evaluating the effectiveness of capital construction projects of oil field facilities (for example, construction work on the site for inventory receiving bridges and lifting units), which

Адрес для переписки

Чазов Евгений Леонидович
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова
ул. Студенческая, 42,
426069, г. Ижевск, Российская Федерация
Тел.: +8 9124 42-36-86
elchazov@mail.ru

Address for correspondence

Chazov Evgeniy L.
Kalashnikov Izhevsk State
Technical University
42, Studencheskaya str.,
426069, Izhevsk, Russian Federation
Tel.: +8 9124 42-36-86
elchazov@mail.ru

allows to eliminate the influence of expert opinion as much as possible and, consequently, significantly improve the quality and validity of management decisions. The choice of the optimal project is based on a two – level assessment (stage 1 – technical assessment, stage 2 – economic assessment). At each stage, an integral indicator is determined by calculation based on the results of objective data analysis and using the developed algorithms. Thus, it is possible to judge the effectiveness of any project without being based on a subjective approach in the assessment with the help of expert opinion.

Keywords: project, technical assessment, economic assessment, integral indicator, project selection, two-level assessment, cost calculation

For citation: Chazov E. L., Grakhov V. P., Simchenko O. L. (2021) Methodological Tools for Evaluating Effectiveness of Capital Construction Projects of Oil Producing Enterprises. *Science and Technique*. 20 (1), 75–82. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-75-82> (in Russian)

Введение

Проектирование и строительство объектов нефтегазовой отрасли в отличие от других видов промышленного строительства имеет ряд специфических особенностей:

- содержание проектов обустройства зависит от размеров и коллекторских свойств залежи, объема извлекаемых запасов нефти, качественных характеристик углеводородного продукта;

- рассредоточенность нефтепромысловых объектов по большой площади;

- сооружение нефтепроводов большой протяженностью для доставки продукции потребителю.

Характерная особенность многих нефтяных месторождений России – необходимость обновления объектов капитального строительства ввиду их длительной эксплуатации. Применение ранее реализованных проектов на стадии ввода месторождения в разработку очень часто является экономически нецелесообразным решением. Это обусловлено снижением продуктивности месторождений из-за роста обводненности скважинной продукции, уменьшения действующего нефтяного фонда и увеличения эксплуатационных затрат. В таких условиях строительство (реконструкция) нефтепромысловых объектов должно быть реализовано с учетом тщательной оценки на основе изучения текущего состояния разработки месторождения, обеспечения его эффективной загруженности и учета наступления всевозможных рисков.

Цель исследований – разработка методического инструментария оценки эффективности проектов капитального строительства нефтепромысловых объектов (на примере проведения строительных работ на площадке под инвентарные приемные мостки и подъемный агрегат) [1]. При этом необходимо решить следующие задачи:

• разработать алгоритмы расчета интегральных показателей для проведения технической и экономической оценки проектов;

• определить подход к расчету значений параметров, необходимых для определения интегральных показателей;

• определить оптимальный проект на основе двухуровневой оценки: технической (1-й этап) и экономической (2-й этап).

Техническая оценка проекта

С учетом специфики проектирования, строительства и эксплуатации объектов нефтегазовой отрасли разработан алгоритм расчета интегральных показателей для проведения технической оценки проектов конструкции площадки под инвентарные приемные мостки и подъемный агрегат для выполнения работ по капитальному ремонту скважин (КРС) (рис. 1).

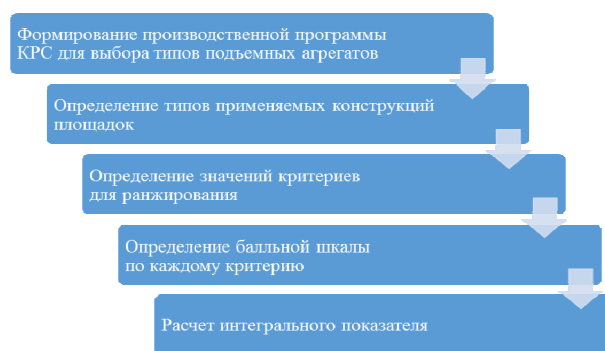


Рис. 1. Алгоритм определения интегрального показателя при технической оценке

Fig. 1. Algorithm for determining the integral indicator in technical assessment

Первый этап. На основе изучения имеющегося опыта с учетом текущего состояния разработки нефтяного месторождения сформирована

долгосрочная производственная программа КРС. По итогам изучения производственной программы КРС определены возможные для применения типы подъемных агрегатов. При изучении особенностей монтажа подъемных агрегатов типов А5-40Т1 (УРАЛ), АПРС-САК-40 (КАМАЗ), А2-32 (УРАЛ) была рассчитана возможность оптимизации длины конструкции площадки на 1,5 м.

Второй этап. Изучен опыт строительства площадок под инвентарные приемные мостки и подъемный агрегат. Ввиду того что эксплуатируемые месторождения находятся на заключительной стадии разработки, экономически целесообразным решением является выбор наиболее дешевых вариантов строительства. Для проведения оценки выбраны семь вариантов: выполнение работ бригадой КРС непосредственно перед ремонтом скважины, проект конструкции из железобетонных плит, проект конструкции из монолитного бетона, проект конструкции из щебеночного покрытия, проект конструкции из песчаной отсыпки, проект конструкции из гравийной отсыпки, использование грунтового покрытия.

Третий этап. На основе проведения анализа простоя скважин по причине отсутствия (неисправности) площадки определены критерии для расчета интегрального показателя. Критерии распределены по значимости следующим образом: несущая способность – 30 %, ремонтпригодность – 25 %, возможность строительства круглый год – 20 %, возможность монтажа подъемного агрегата в период бездорожья – 15 %, универсальность для всех типов подъемных агрегатов – 10 %. Итого – 100 %.

Четвертый этап. Для оценки эффективности выбранных типов конструкций по каждому критерию используется пятибалльная шкала. Значения устанавливаются согласно проведенным техническим расчетам. Так, например, для принятия решения по наиболее значимому критерию «несущая способность» расчетным путем определяли сопротивление грунта по формуле

$$R = \frac{m_1 m_2}{k} (M_1 k_z b \gamma + M_2 d_1 \gamma' + (M_2 - 1) d_b \gamma' + M_3 c), \quad (1)$$

где m_1 , m_2 , k , M_1 , M_2 , M_3 – коэффициенты, принимаемые по табличным условиям; k_z – коэффициент: при $b < 10$ м $k_z = 1$ при $b > 10$ м $k_z = z/b + 0,2$ ($z = 8$ м); b – ширина подошвы фундамента; γ , γ' – осредненное значение удельного веса грунтов, залегающих ниже и выше подошвы фундамента соответственно; c – расчетная величина удельного сцепления грунта, залегающего непосредственно под подошвой фундамента; d_b – глубина подвала, т. е. расстояние от уровня планировки до пола подвала [2].

На основе проведенного технического расчета три проекта не были допущены для дальнейшей оценки (табл. 1).

Аналогичный подход выставления баллов применялся по другим критериям.

Пятый этап. На основании максимального значения при сложении взвешенных оценок по каждому критерию определяли приоритетный вариант типа конструкции площадок. По итогам технической оценки максимальный интегральный показатель соответствовал проекту конструкции из железобетонных плит (табл. 2).

Таблица 1

Показатели несущей способности покрытий
Indicators of bearing capacity of coatings

Тип конструкции	Паспортное давление на грунт для выбранного типа подъемного агрегата, МПа	Несущая способность покрытия, МПа	Оценка по пятибалльной шкале	Примечание
Проект конструкции из: железобетонных плит	0,30	0,45	4	Соответствует
монолитного бетона		0,46	4	
гравийной отсыпки		0,32	1	
песчаной отсыпки		0,28	0	Не соответствует
щебеночного покрытия		0,29	0	
Грунтовое покрытие		0,27	0	

Определение интегрального показателя по итогам технической оценки
Determination of integral indicator based on the results of technical assessment

Тип конструкции	Несущая способность (30 %)	Ремонто-пригодность (20 %)	Возможность строительства круглый год (20 %)	Возможность монтажа подъемного агрегата в период бездорожья (15 %)	Универсальность для всех типов подъемных агрегатов (10 %)	Ранжирование
Выполнение работ бригадой КРС с использованием железобетонных плит	4	2	3	2	4	300
Проект конструкции из: железобетонных плит	4	3	3	4	3	345
монолитного бетона	4	1	1	4	2	245
гравийной отсыпки	1	5	2	1	3	240
песчаной отсыпки	0					
щебеночного покрытия	0					
Грунтовое покрытие	0					

Экономическая оценка проекта

Экономическая оценка проекта заключалась в сравнении стоимости строительства площадок. На рис. 2 представлена методика расчета стоимости строительства площадок различного типа.

Расчет стоимости строительства площадок различного типа осуществляли по следующим формулам:

$$P_1 = \left(V_1 C_1 + V_2 C_2 + \frac{DC_3}{V_3 24} \right) PP + BCP_1; \quad (2)$$

$$P_{2,3,4} = \left(CP_{2,3,4} RU_{2,3,4} \right) \frac{F}{S_{2,3,4}}, \quad (3)$$

где $P_{1,2,3,4}$ – стоимость строительства площадок различного типа; $C_{1,2,3}$ – единичная расценка за

работу транспортного звена, бригады КРС и стоимости нефти; $V_{1,2,3}$ – время работы транспортного звена, бригады КРС и простоя скважины; $CP_{1,2,3,4}$ – единичная расценка стоимости площадки различного типа; $RU_{2,3,4}$ – единичная расценка за установку площадок различного типа; $S_{2,3,4}$ – срок службы площадок различного типа; D – средний дебит нефти по фонду скважин; PP – производственная программа КРС на год по количеству ремонтов; B – количество бригад КРС; F – общий фонд скважин для установки площадок.

Для определения интегрального показателя оценки риска воспользуемся следующим алгоритмом (рис. 3).

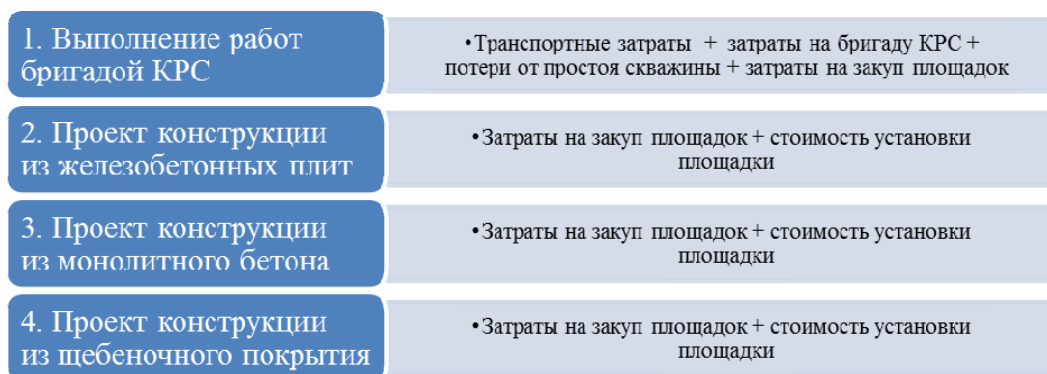


Рис. 2. Методика расчета стоимости строительства площадок различного типа

Fig. 2. Methodology for calculating the construction cost of building sites of various types

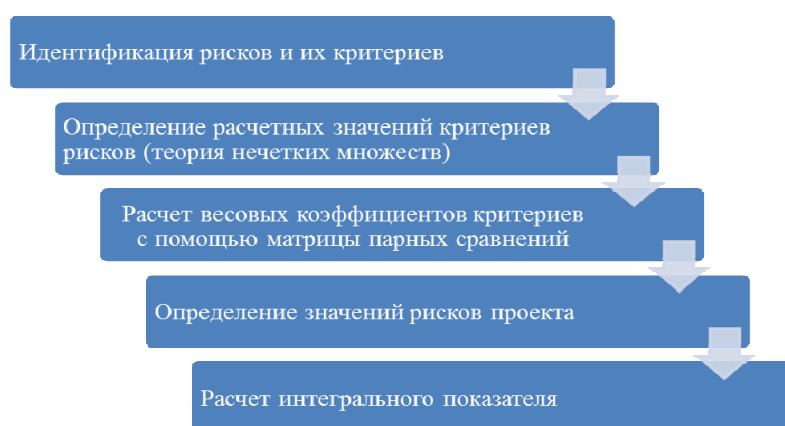


Рис. 3. Алгоритм определения интегрального показателя при экономической оценке

Fig. 3. Algorithm for determining the integral indicator in economic assessment

Первый этап. Идентификация рисков и их критериев. С помощью экспертных оценок определены четыре группы рисков строительства площадок под инвентарные приемные мостки и подъемный агрегат: A_1 – изменение производственной программы КРС; A_2 – преждевременное разрушение конструкции; A_3 – изменение цен; A_4 – климатические условия. В качестве критериев оценки рисков определены следующие показатели: X_1 – тяжесть последствий; X_2 – частота возникновения; X_3 – вероятность обнаружения; X_4 – размер ущерба; X_5 – размер затрат на устранение; X_6 – время проявления эффекта от управления [3–5].

Второй этап. Определение расчетных значений критериев рисков – производится на ос-

нове теории нечетких множеств [6, 7]. Найдем расчетные значения критериев рисков с помощью графиков принадлежности (рис. 4).

Третий этап. Расчет весовых коэффициентов критериев риска производится с помощью матрицы парных сравнений (рис. 5).

Четвертый и пятый этапы. Определение значений рисков проекта и расчет интегрального показателя. Определение значений рисков проекта производится на основе полученных расчетных значений критериев и их весов [8–10]. При сложении взвешенных оценок по каждому риску определяется интегральный показатель риска для каждого проекта (рис. 6).

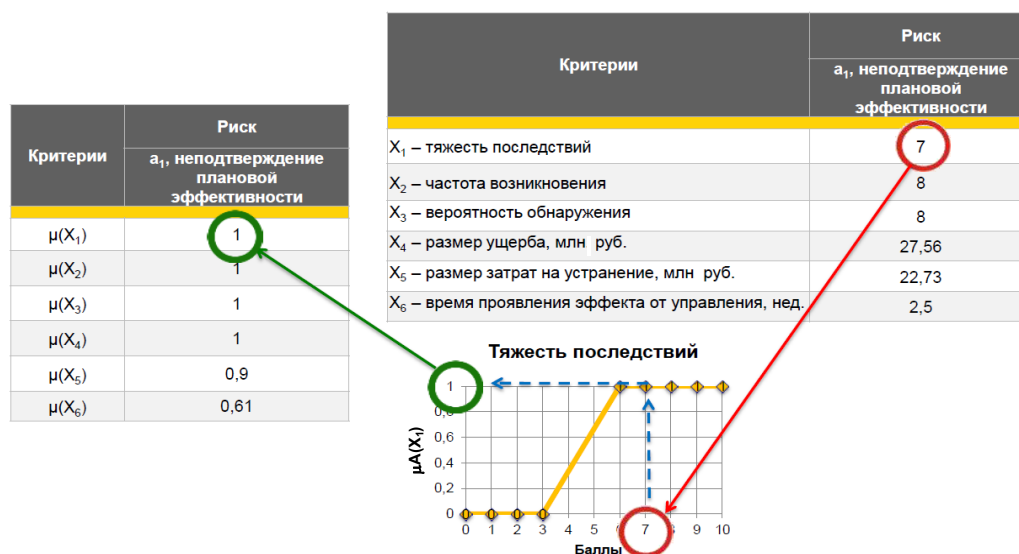


Рис. 4. Определение расчетных значений критериев рисков

Fig. 4. Determination of calculated values of risk criteria

Критерии	X ₁ – тяжесть последствий	X ₂ – частота возникновения	X ₃ – вероятность обнаружения	X ₄ – размер ущерба	X ₅ – размер затрат на устранение	X ₆ – время проявления эффекта от управления	Весовой коэффициент
X ₁ – тяжесть последствий	1	5	3	1/3	1/3	3	1,308
X ₂ – частота возникновения	1/5	1	1/5	1/7	1/7	1/3	0,255
X ₃ – вероятность обнаружения	1/3	5	1	1/3	1/3	5	0,987
X ₄ – размер ущерба	3	7	3	1	1	5	2,608
X ₅ – размер затрат на устранение	3	7	3	1	1	3	2,396
X ₆ – время проявления эффекта от управления	1/3	3	1/5	1/5	1/3	1	$\left(\frac{1}{3} \cdot 3 \cdot \frac{1}{5} \cdot \frac{1}{5} \cdot \frac{1}{3} \cdot 1 \right)^{1/6} = 0,487$

Рис. 5. Расчет весовых коэффициентов критериев риска

Fig. 5. Calculation of weight coefficients of risk criteria

Риски	Критерии					
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆
a ₁ , неподтверждение плановой эффективности	1	1	1	1	0,9	0,61
Весовой коэффициент	1,308	0,255	0,987	2,608	2,396	0,487

$$11,308 ; 1^{0,255} ; 1^{0,987} ; 1^{2,608} ; 0,9^{2,396} ; 0,61^{0,487} \rightarrow \min (1; 1; 1; 1; 0,777; 0,786)$$

Риск 1	Риск 2	Риск 3	Риск 4	Интегральный показатель риска
0,777 × 0,4	+ 0,535 × 0,2	+ 0,394 × 0,23	+ 0,786 × 0,17	= 0,642

Рис. 6. Определение значений рисков проекта

Fig. 6. Determination of project risk values

На основе проведенной экономической оценки [9–12] с учетом влияния интегрального показателя риска [13, 14] установлено, что оп-

тимальным вариантом реализации проекта является конструкция из железобетонных плит (табл. 3).

Таблица 3

Определение затрат по итогам экономической оценки
Determination of costs based on the results of economic assessment

Показатель	Выполнение работ бригадой КРС	Проект конструкции из		
		железобетонных плит	монолитного бетона	щебеночного покрытия
Всего затрат без учета интегрального показателя, тыс. руб./год	373267	246240	279720	215460
Интегральный показатель, уд. ед.	0,922	0,902	0,742	0,642
Всего затрат с учетом интегрального показателя, тыс. руб./год	402381	270372	351888	292595

Двухуровневая оценка проекта

Выбор оптимального проекта осуществляется на основе двухуровневой оценки: технической (1-й этап) и экономической (2-й этап). Определяем, что максимальное количество баллов должно быть не более 100, для 1-го и 2-го этапов – по 50 баллов соответственно ввиду их равноценной значимости. На каждом этапе оценивания с учетом сравнения четырех проектов баллы должны быть распределены следующим образом: 1-е место – 50 баллов, 2-е – 37,5, 3-е – 25, 4-е место – 12,5 балла. По итогам проведенного расчета максимальное количество баллов набрал проект конструкции из железобетонных плит (рис. 7).

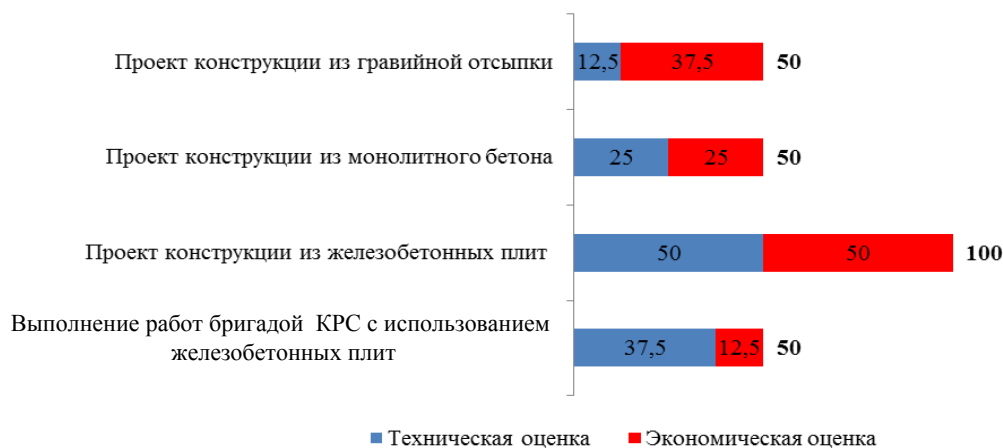


Рис. 7. Выбор проекта на основе двухуровневой оценки

Fig. 7. Project selection based on two-level evaluation

ВЫВОДЫ

1. С учетом особенности эксплуатации месторождений на заключительной стадии разработки обосновывается выбор проекта строительства площадки под инвентарные приемные мостки и подъемный агрегат в рамках обустройства нефтепромысловых объектов.

2. Разработан методический инструментарий оценки эффективности проектов капитального строительства нефтепромысловых объектов.

3. Получены и представлены основные результаты, обеспечивающие достижение поставленных задач, обладающие признаками научной новизны и характеризующие теоретическую и практическую значимость исследований:

– приведены алгоритмы определения интегральных показателей для проведения технической и экономической оценок проектов,

с помощью которых можно судить об их эффективности, не основываясь на субъективном подходе в оценке с помощью экспертного мнения;

– систематизирован подход к расчету значений параметров, необходимых для определения интегральных показателей;

– для повышения качества и обоснованности принимаемых управленческих решений использован подход на основе двухуровневой оценки эффективности проектов: технической (1-й этап) и экономической (2-й этап). По итогам ее проведения максимальное количество баллов набрал проект конструкции из железобетонных плит.

4. В процессе исследований получены следующие практические результаты:

– определена возможность оптимизации длины конструкции на 1,5 м от проектного значения за счет выбора оптимального типа подъемного агрегата;

– по результатам проведенных расчетов три проекта не были допущены для дальнейшей оценки;

– экономическая оценка без учета интегрального показателя риска создает высокую вероятность выбора неоптимального проекта.

5. Разработанный методический инструментарий оценки эффективности проектов капитального строительства нефтепромысловых объектов может быть реализован на любом предприятии нефтедобывающего комплекса, осуществляющего эксплуатацию месторождений на заключительной стадии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Повышение эффективности планирования как основа управления инвестиционной деятельностью промышленного предприятия / Е. Л. Чазов [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 1. С. 88–100. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-88-100>.
2. Проектирование фундаментов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://vunivere.ru/work30723/page2/>. Дата доступа: 29.08.2019.
3. Управление рисками при реализации инвестиционно-строительных проектов / В. П. Грахов [и др.] // Экономика и предпринимательство. 2014. Т. 42, № 1–2. С. 400–404.
4. Шлопаков, А. В. Управление рисками при реализации инвестиционных строительных проектов / А. В. Шлопаков // Российское предпринимательство. 2013. Т. 225, № 3. С. 25–30.
5. Оленин, Д. С. Управление рисками вертикально интегрированных металлургических компаний / Д. С. Оленин. СПб., 2008. 188 с.
6. Risk Management and Managerial Efficiency in Chinese Banks: a Network DEA Framework [Electronic resource]. Mode of access: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/65817/1/622728024.pdf>. Date of access: 29.08.2019.
7. Transforming Risk Efficiency and Effectiveness [Electronic resource]. Mode of access: <https://www.mckinsey.com/business-functions/risk/our-insights/transforming-risk-efficiency-and-effectiveness>. Date of access: 29.08.2019.
8. Compliance Risk Management: Managing and Improving Tax Compliance [Electronic resource]. Mode of access: <https://www.oecd.org/ctp/administration/33818656.pdf>. Date of access: 29.08.2019.
9. Поморцева, И. М. Управление рисками инвестиционных проектов: проблемы идентификации и алгоритмы реагирования / И. М. Поморцева // Вестник РГГУ. Серия: Экономика. Управление. Право. 2011. № 4. С. 129–143.
10. Имамов, Р. Р. Разработка теоретико-прикладного инструментария оценки инвестиционных проектов в нефтедобывающей промышленности с учетом рисков факторов / Р. Р. Имамов. Пермь, 2015. 24 с.
11. Глеков, С. Л. Механизм принятия инвестиционных решений с учетом альтернативы «эффективность–надежность» / С. Л. Глеков. М., 2011. 26 с.
12. Айхель, К. В. Управление рисками инвестиционных проектов на промышленных предприятиях / К. В. Айхель. Челябинск, 2011. 28 с.
13. Управление проектами [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.bestreferat.ru/referat-134032.html>. Дата доступа: 29.08.2019.
14. Анализ и систематизация основных подходов и методов оценки эффективности предприятия / О. Л. Симченко [и др.] // Вестник Челябинского государственного университета. Экономические науки. 2018. № 7. С. 104–111.

Поступила 17.12.2019
Подписана в печать 19.02.2020
Опубликована онлайн 29.01.2021

REFERENCES

1. Chazov E. L., Grakhov V. P., Krivorotov V. V., Simchenko O. L. (2019) Improving Efficiency of Planning as a Basis for Management of Investment Activity of Industrial Enterprise. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62, (1), 88–100. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-88-100> (in Russian).
2. *Design of Foundations*. Available at: <https://vunivere.ru/work30723/page2/>. (Accessed 29 August 2019) (in Russian).
3. Grakhov V. P., Yakushev N. M., Repin A. A., Zakharova V. V. (2014) Risk Management in the Implementation of Investment and Construction Projects. *Ekonomika i Predprinimatel'stvo = Journal of Economy and Entrepreneurship*, 42 (1–2), 400–404 (in Russian).
4. Shlopakov A. V. (2013) Risk Management in the Implementation of Investment Construction Projects. *Rossiiskoe Predprinimatel'stvo [Russian Entrepreneurship]*, 225 (3), 25–30 (in Russian).
5. Olenin D. S. (2008) *Risk Management of Vertically Integrated Metallurgical Companies*. Saint-Petersburg. 188 (in Russian).
6. Matthews K. (2010) *Risk Management and Managerial Efficiency in Chinese Banks: a Network DEA Framework*. Cardiff Economics Working Papers, No E2010/1. Available at: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/65817/1/622728024.pdf>. (Accessed 29 August 2019).
7. *Transforming Risk Efficiency and Effectiveness*. Available at: <https://www.mckinsey.com/business-functions/risk/our-insights/transforming-risk-efficiency-and-effectiveness>. (Accessed 29 August 2019).
8. *Compliance Risk Management: Managing and Improving Tax Compliance*. Available at: <https://www.oecd.org/ctp/administration/33818656.pdf>. (Accessed 29 August 2019).
9. Pomortseva I. M. Risk-Management in Investment Projects: Problems of Identification and Response. *Vestnik RGGU. Seriya: Ekonomika. Upravlenie. Pravo = RSUH/RGGU Bulletin "Economics. Management. Law" Series*, (4), 129–143 (in Russian).
10. Imamov R. R. (2015) *Development of Theoretical and Applied Tools for Assessing Investment Projects in the Oil Industry Taking into Account Risk Factors*. Perm. 24 (in Russian).
11. Glekov S. L. (2011) *Mechanism for Making Investment Decisions Based on the Alternative "Efficiency–Reliability"*. Moscow. 26 (in Russian).
12. Aichel K. V. (2011) *Risk Management of Investment Projects at Industrial Enterprises*. Chelyabinsk. 28 (in Russian).
13. *Project Management*. Available at: <https://www.bestreferat.ru/referat-134032.html>. (Accessed 29 August 2019) (in Russian).
14. Simchenko O. L., Grakhov V. P., Maksimov K. V., Chazov E. L. (2018) Analysis and Systematization of Main Approaches and Methods for Assessing Efficiency of Enterprise. *Vestnik Chelyabinskogo Gosudarstvennogo Universiteta = Bulletin of Chelyabinsk State University. Economic Sciences*, (7), 104–111 (in Russian).

Received: 17.12.2019
Accepted: 19.02.2020
Published online: 29.01.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-83-90>

УДК 005.334

Выбор метода качественного и количественного анализа рисков для предприятий энергетики

Магистр экон. наук Е. И. Тымуль¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Реформирование энергетики Республики Беларусь, которое в последние несколько лет перешло к стадии активного внедрения, принесет значительные изменения в управление энергетическими предприятиями. Внедрение риск-менеджмента для энергетических организаций станет необходимым этапом, который обоснован переходом энергетики к рыночным отношениям. В связи с этим следует рассмотреть основные вопросы оценки рисков энергетических предприятий. Предложена методика качественного и количественного анализа всех рисков, с которыми может столкнуться энергетическое предприятие в процессе генерации энергии. Отмечены подходы различных авторов к алгоритму качественного анализа риска. Это позволило уточнить основные задачи, требующие решения при проведении качественного анализа рисков. Представлен анализ методов количественного анализа рисков. К наиболее часто применяемым относятся методы сценарного анализа и математической статистики, методы аналогий и аналитический, методы оценки потерь, экспертных оценок и теории статистических игр. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки. Выполненный анализ количественных рисков позволил обосновать выбор методов, применимых для энергетики с учетом специфики вида деятельности. Рассмотрены различные шкалы для оценки величины вероятности и возможных потерь от рисков. Представлен сравнительный анализ данных шкал и обоснован выбор шкалы для энергетических предприятий. Уделено внимание проблеме классификации вероятности свершения рисков событий. Рассмотрена методика определения величины возможных потерь при свершении рисков события. Возможные потери классифицированы по следующим группам: перебои в технологическом процессе, последствия для людей, экологические последствия. Отдельно рассмотрены возможные финансовые потери, а также потери с позиции закона и репутации. Выполнен критический обзор методов управления рисками. Определены наиболее перспективные для предприятий энергетики методы управления рисками.

Ключевые слова: энергетика, специфика деятельности, риски, управление, качественный анализ, количественный анализ, вероятность, величина последствий, методики управления рисками

Для цитирования: Тымуль, Е. И. Выбор метода качественного и количественного анализа рисков для предприятий энергетики / Е. И. Тымуль // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 1. С. 83–90. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-83-90>

Choosing Method for Qualitative and Quantitative Risk Analysis for Energy Enterprises

Е. И. Tymul¹⁾

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

Abstract. The reform of the energy sector in the Republic of Belarus, which in the last few years has moved to the stage of active implementation, will bring significant changes in the management of energy enterprises. The introduction of risk management for energy enterprises will become a necessary stage, which is justified by the transition of the energy sector to market relations. In this regard, it is necessary to consider the main issues of risk assessment for energy enterprises. The paper

Адрес для переписки

Тымуль Евгения Игоревна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-75-35
tymul@bntu.by

Address for correspondence

Tymul Evgeniya I.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-75-35
tymul@bntu.by

proposes a method for qualitative and quantitative analysis of all the risks that an energy enterprise may face in the process of energy generation. The approaches of various authors to the algorithm of qualitative risk analysis have been considered in the paper. This has made it possible to clarify the main tasks that need to be solved when conducting a qualitative risk analysis. The paper also presents an analysis of methods for quantitative risk analysis. The most commonly used methods include scenario analysis and mathematical statistics, analogy and analytical methods, methods for assessing losses, expert assessments and the theory of statistical games. Each of these methods has its own advantages and disadvantages. The performed analysis of quantitative risks has permitted to substantiate the choice of methods applicable to the energy sector, taking into account the specificity of activity type. The paper has studied various scales for estimating the probability and possible losses from risks. A comparative analysis of these scales is presented and the choice of a scale for energy enterprises is justified in the paper. Attention has been paid to the problem of probability classification pertaining to occurrence of risk events. The methodology for determining the value of possible losses when performing a risk event has been considered in detail. Potential losses are classified into the following groups: interruptions in the technological process, consequences for people, environmental consequences. Possible financial losses, as well as losses from the position of the law and reputation, have been considered separately. A critical review of risk management methods has been performed in the paper. The paper has identified the most promising methods of risk management for energy enterprises

Keywords: energy, specificity of activity, risks, management, qualitative analysis, quantitative analysis, probability, magnitude of consequences, risk management methodology

For citation: Tymul E. I. (2021) Choosing Method for Qualitative and Quantitative Risk Analysis for Energy Enterprises. *Science and Technique*. 20 (1), 83–90. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-83-90> (in Russian)

Введение

Энергетика является одним из базовых видов экономической деятельности, так как от ее стабильного функционирования зависит эффективность всех секторов национальной экономики. Проблемы, с которыми в последние десятилетия столкнулась энергетика (значительный физический и моральный износ оборудования, закредитованность, наличие перекрестного субсидирования и т. д.), показали, что необходимы коренные изменения. Сегодня энергетика активно движется в направлении перехода от государственной монополии к рыночным отношениям. Для энергетических предприятий эти перемены принесут с собой необходимость самостоятельного ведения хозяйственной деятельности, что будет связано с большим количеством различных рисков. В настоящее время в Республике Беларусь нет общепринятой методики оценки и управления рисками, учитывающей особенности деятельности энергетических предприятий.

Основная часть

Анализ и оценка рисков является одним из основных этапов процесса управления рисками. От качества проведения данного этапа во многом будет зависеть эффективность всей системы управления рисками. Анализ рисков принято разделять на качественный и количественный.

Ученые по-разному трактуют содержание качественного анализа. Так, Л. Ф. Догиль счи-

тает, что при проведении качественного анализа требуется «выявить основные виды рисков, влияющих на финансово-хозяйственную деятельность фирмы, компании, и уже на начальном этапе оценить количественный состав рисков» [1]. В. В. Арсенов и И. В. Жарков утверждают, что при проведении качественного анализа оценки «указываются вид риска, его причины, последствия, меры по снижению убытка и профилактические меры». Анализ трактовок сущности качественного анализа рисков, отраженных в работах отечественных и зарубежных авторов [2–7], позволил сформулировать основные задачи качественного анализа:

- 1) определение факторов риска;
- 2) определение этапов работы, процессов или хозяйственных операций, при выполнении которых возникает риск;
- 3) идентификация рисков и их характеристика.

Выявление и идентификация рисков – важные этапы, позволяющие сформировать эффективную систему управления рисками, поскольку только на выявленные риски можно оказать управленческое воздействие, в то время как невыявленные риски могут оказать непредсказуемое, а в некоторых случаях и катастрофическое влияние на деятельность предприятия.

Рынок энергии принципиально отличается от рынков любых других товаров и услуг в силу своей технологической специфики. Прежде всего, это обусловлено особенностью производственных процессов в энергетике, а именно – электротехнических процессов, протека-

ющих в генерации и передаче энергии (технологическое единство и совпадение во времени процессов генерации, передачи и потребления энергии; параллельная работа всех станций на совмещенный суточный график нагрузки района; динамичность во времени параметров энергетических процессов при синхронной работе электростанций требует автоматизации управления электростанциями и сетевыми объектами и т. д.), а также особенностью энергии как товара (невозможность складировать электроэнергию; обезличенность электроэнергии как товара, так как вся электроэнергия поступает в общую сеть; невозможность выбраковки энергии и т. д.) [8].

Качественный анализ рисков с учетом специфики деятельности энергетических предприятий, проведенный в [9], позволил определить перечень рисков энергетических предприятий: внешние (политико-экономические, правовые и регуляторные, рыночные, природно-естественные, финансовые, инвестиционные) и внутренние риски (производственно-технические, финансовые, несанкционированных отборов, организационные, исполнительские, технической безопасности, экологические).

Количественная оценка рисков – продолжение их качественного анализа. Они предполагают выявление таких характеристик риска, как вероятность и размер возможного ущерба, и базируется на инструментарии теории вероятностей, математической статистики, теории исследования операций и т. д. Существует множество различных методов оценки рисков. Согласно анализу работ различных авторов [10–15], наиболее часто применяемыми являются методы сценарного анализа и математической статистики, методы аналогий и аналитический, методы оценки потерь, экспертных оценок и теории статистических игр. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки. Рассмотрим их подробнее.

К методам сценарного анализа относятся метод Монте-Карло, метод «древа решений» и диаграмма Торнадо. Они обеспечивают наглядность полученных в результате анализа данных в виде графического отображения различных вариантов решений. Также эти методы относительно просты в использовании при известном количестве альтернативных сценариев

развития ситуации с известными вероятностными и стоимостными показателями. Однако большое количество альтернативных вариантов развития ситуации приводит к значительному возрастанию объемов расчетов, что, в свою очередь, увеличивает вероятность ошибок.

При использовании *методов математической статистики* проводится расчет таких величин, как дисперсия, среднее квадратическое отклонение, вариация и корреляция, математическое ожидание. Основные достоинства данных методов – объективность и точность в сочетании с простотой использования. В то же время для проведения математических расчетов требуется наличие большого объема исходных данных, которые будут применены в достаточно громоздких вычислениях. Также при использовании методов математической статистики не учитывается влияние различных внутренних и внешних факторов.

Аналитические методы основаны на использовании абсолютных и относительных показателей и не предполагают применение статистической обработки. Они позволяют произвести всестороннюю оценку надежности и эффективности предприятия. Используемые методики отличаются простотой, информативностью и доступностью. Основной сложностью при применении данных методов является определение оптимальных (эталонных) значений выбранных показателей, а также то, что расчеты сопряжены с использованием большого количества исходных данных.

Использование *метода оценки потерь* требует наличия значений вероятности возникновения рисков ситуации и величины возможных потерь. Данный метод позволяет получить оценку степени риска в стоимостном выражении. Главным его преимуществом можно считать наглядность полученных результатов в виде графического изображения кривой потерь или карты рисков. В то же время с помощью такого метода определяется лишь уровень отдельного риска по факту получения конечного результата.

Методы экспертных оценок нашли широкое применение в риск-менеджменте. Основными вариантами экспертной оценки являются ранжирование, непосредственная оценка, по-

следовательное сравнение, парное сравнение. Данные методы эффективны при решении сложных, нестандартных и неформализованных проблем, требующих широкого спектра знаний, опыта и интуиции компетентных специалистов. Основными недостатками метода экспертных оценок являются: трудности проведения процедуры опроса, вероятность ошибок на стадии отбора экспертов, отсутствие абсолютных гарантий правильности полученных оценок ввиду наличия субъективизма.

Метод использования аналогов заключается в поиске сходных (аналогичных) ситуаций, проектов или событий. Он прост в использовании, однако во многом зависит от знаний и опыта риск-менеджера, а значит, подвержен высокой степени субъективизма.

Методы теории статистических игр, такие как критерии Вальда, Сэвиджа, Гурвица, Байеса, Лапласа и т. д., чаще применяются при принятии решений в условиях неопределенности. Главные преимущества – учет различных факторов. Однако существует сложность в определении воздействия неконтролируемых факторов, в особенности факторов внешней среды.

Проанализировав достоинства и недостатки различных методов оценки рисков, а также учитывая специфику деятельности и производственного процесса генерирующих предприятий, можно сделать следующие выводы:

- наиболее подходящими для проведения количественного анализа рисков энергетических предприятий будут аналитические методы и методы оценки потерь, поскольку они обеспечивают достаточно точную оценку как самих отдельных рисков, так и их стоимостного выражения. Применение данных методов также возможно для энергетических предприятий в связи с наличием подходящей методической, нормативно-правовой и инструктивной баз;

- использование метода экспертных оценок может найти широкое применение для анализа рисков энергетических предприятий, так как обеспечивает наиболее полный учет количественных и качественных параметров. Одной из особенностей энергетики является высокий уровень квалификации персонала, что обеспечивает наличие опытных экспертов. Однако

требуется повышение квалификации специалистов энергетических предприятий в области риск-менеджмента для увеличения качества принимаемых решений;

- применение методов сценарного анализа, математической статистики, методов использования аналогов и теории статистических игр для энергетических предприятий ограничено. Связано это с недостаточностью или полным отсутствием необходимых статистических данных и информационных баз, а также информации об аналогичных ситуациях или сценариях ввиду новизны применения риск-менеджмента для предприятий энергетики.

В практике оценки рисков существует несколько основных методов. Одним из них является метод FMEA (от англ. Failure Mode and Effects Analysis), который применяется для управления рисками потенциальных дефектов в новых проектах промышленных предприятий. В основе данного метода лежит оценка трех критериев – значимости (насколько тяжелыми будут последствия данного дефекта для потребителя), вероятности (как часто возникает определенное нарушение и может ли ситуация повториться), обнаружения (возможность обнаружения) [16]:

$$R = SOD,$$

где S – значимость (Severity), баллы; O – вероятность (Occurrence), баллы; D – обнаружение (Detection), баллы.

Однако метод FMEA применим только для оценки производственных рисков и не подходит для других видов. Поэтому мы считаем целесообразным использование иного метода, в основе которого лежит определение двух основных показателей – вероятности возникновения риска и величины потенциальных последствий. Для определения уровня риска необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$R = PS,$$

где P – вероятность возникновения риска, баллы; S – величина потенциальных последствий, баллы.

Последовательность применения метода оценки потерь:

– определить размерность шкал оценки вероятности возникновения риска и величины потенциальных последствий;

– задать каждому значению в шкалах четкие параметры;

– определить критерии критичности для риска.

Первым шагом является определение размерности шкал для вероятности возникновения риска и тяжести последствий. В практике управления рисками применяются 10-, 5-, 4- и 3-балльные шкалы. В табл. 1 представлена характеристика значений вероятности возникновения риска и величины потенциальных последствий в шкалах различных размерностей.

При проведении анализа рисков для энергетических предприятий будем использовать 4-балльную шкалу. Это связано с тем, что такая размерность шкалы позволяет избежать избыточного объема информации, как при использовании 10-балльной шкалы, в то же время обеспечивая достаточность количества информации.

Далее зададим каждому значению в шкалах четкие параметры. Как говорилось ранее, будем использовать 4-балльную шкалу количественной оценки вероятности (табл. 2).

Оценка тяжести последствий должна отражать специфику деятельности предприятия. Процессы производства энергии во многом отличаются от других производственных процессов, что было отмечено выше. Большинство разработанных шкал потенциальных последствий рассматривают либо только последствия определенной группы рисков, либо сводят оценку тяжести последствий лишь к стоимостной оценке. Однако перебои в генерации энергии приводят не только к финансовым потерям, но также могут нанести значительный вред экологии или привести к травмированию людей. Поэтому мы считаем необходимым оценивать потенциальные последствия по таким параметрам, как: величина финансовых потерь, последствия для людей, последствия с позиции закона и репутации, экологические последствия, последствия перебоев в технологическом процессе (табл. 3).

Таблица 1

Характеристика величин в различных шкалах
Characterization of quantities in various scales

Количественный показатель, балл				Качественный показатель		Количественный показатель, балл						
				вероятности возникновения риска	величины потенциальных последствий							
3	4	5	10	Всегда	Катастрофическая	10	5	4	3			
			9	Практически неизбежно	Критическая	9						
2	3	4	8	Очень часто	Высокая	8	4	3	2			
			7	Часто	Значительная (серьезная)	7						
	2	3	6	Возможно	Существенная	6	3	2				
			5	Периодически	Средняя	5						
		2	2	4	Редко	Умеренная				4	2	2
				3	Маловероятно	Низкая				3		
1	1	1	2	Практически невозможно	Приемлемая	2	1	1	1			
			1	Невероятно	Незначительная	1						

Таблица 2

Количественная оценка вероятности возникновения риска для энергетических предприятий
Quantification of probability for risk occurrence for energy enterprises

Балл	Вероятность риска	Описание риска
4	Практически неизбежен	1 раз в течение рабочей смены или чаще
3	Часто	1 раз в месяц или чаще
2	Редко	1 раз в квартал или чаще
1	Не вероятен	Реже, чем 1 раз в полугодие-год

Шкала величины потенциальных последствий рисков для генерирующих предприятий
Scale of potential consequences of risks for generating enterprises

Балл	Величина потенциальных последствий	Перебои в технологическом процессе	Последствия для людей	Экологические последствия
4	Катастрофическая	Авария	Пожар, взрыв, несчастный случай со смертельным исходом или с полной потерей трудоспособности, групповой несчастный случай с числом пострадавших два и более человек	$\geq 0,8$ ПДК*
3	Существенная	Отказ I степени	Тяжелый несчастный случай, который вызывает постоянные (профзаболевание), инвалидность или длительные последствия (временная нетрудоспособность более 30 дней)	$\geq 0,6$ ПДК и $< 0,8$ ПДК
2	Умеренная	Отказ II степени	Предполагает обращение работника за медицинской помощью; временная нетрудоспособность (до 30 дней)	$\geq 0,4$ ПДК и $< 0,6$ ПДК
1	Приемлемая	Технологическое нарушение	Без травм/заболеваний или микротравмы (незначительный порез, ушиб)	$< 0,4$ ПДК

* Предельно допустимая концентрация (ПДК) – это максимальная концентрация вещества в атмосферном воздухе (мг/м^3), которая не оказывает на человека прямого или косвенного вредного воздействия, не влияет на его самочувствие и не снижает работоспособность (включая отдаленные последствия).

Классификация технологических перебоев и определение аварии и отказов для энергетического оборудования приведены в СТП 09110.20.817–13 «Инструкция по расследованию и учету нарушений в работе энергоисточников, электрических и тепловых сетей». Также при оценке рисков для энергетических предприятий возможен учет финансовых потерь. Анализ этих потерь может быть осуществлен на основе анализа показателей как ликвидности и платежеспособности, так и эффективности использования краткосрочных активов энергетических предприятий.

Функционирование энергетических предприятий как самостоятельных хозяйствующих субъектов столкнет их с необходимостью оценки последствий с точки зрения репутации и закона. Свершение рискового события может в значительной степени повлиять не только на финансовое состояние предприятия, но и на оценку его репутации со стороны потребителей. Так, последствие в виде дисциплинарного взыскания с ответственного лица или внутреннее расследование может быть приемлемым. Умеренные штрафные санкции, применение административной ответственности к виновным или разовое упоминание в единичных источниках СМИ будут умеренными последствиями. Тогда как привлечение следственного комитета, применение уголовной ответственности к виновным, упоминание во всех ведущих СМИ или полный запрет на деятельность могут быть существенными или даже катастрофическими

последствиями для энергетического предприятия.

Перечень видов последствий, а также степень влияния каждого вида последствия на конкретное предприятие должны формироваться с учетом всех его особенностей. После того как будут определены вероятность и величина вероятных последствий от риска, может быть разработана матрица оценки рисков. В зависимости от величины значимости риска можно разделить на группы: от 1 до 4 баллов – приемлемый риск, от 6 до 9 баллов – значительный риск, 12 баллов – высокий риск, 16 баллов – катастрофический риск. Определение величины значимости риска необходимо для выбора метода реагирования и управления данным риском.

На практике существует множество методов управления риском, которые можно сгруппировать в четыре основные группы: методы уклонения от риска, методы передачи риска, методы снижения риска, методы принятия риска. Рассмотрим более подробно данные группы методов управления рисками (рис. 1).

Методы уклонения от риска применяются в том случае, если существует возможность избежать или отказаться от определенного вида риска. Чаще всего при помощи данной группы методов управляют рисками, связанными с работой с поставщиками или клиентами. К методам уклонения от риска относятся отказ от работы с ненадежными клиентами, партнерами или поставщиками, а также отказ от рискованных ситуаций.

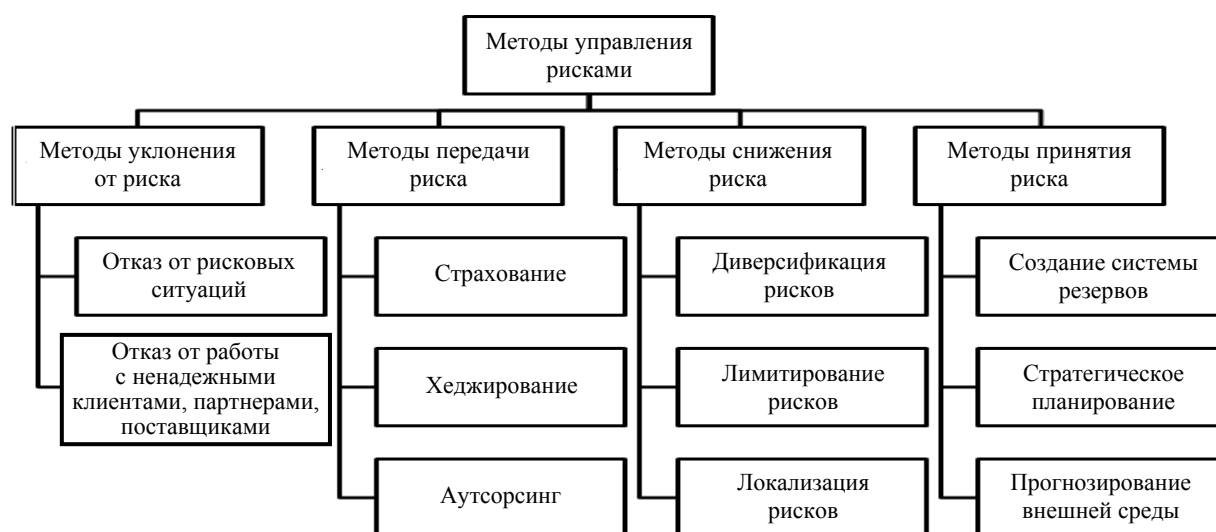


Рис. 1. Классификация методов управления рисками

Fig. 1. Classification of risk management methods

Если же возможности избежать риска не существует, то требуется определить, можно ли перенести риск на других лиц. К методам передачи риска относятся аутсорсинг, страхование и хеджирование риска. Аутсорсинг управления рисками имеет ряд преимуществ и недостатков. Стоит учитывать тот факт, что при использовании аутсорсинга есть вероятность потери контроля над деятельностью организации или специалистов, которые предоставляют услуги по управлению рисками. Поэтому наиболее часто используемыми методами передачи рисков являются страхование и хеджирование.

К методам снижения рисков относят диверсификацию, лимитирование и локализацию рисков. Локализацию рисков используют крайне редко, так как для применения данного метода требуется четко идентифицировать риски, источники их возникновения, этапы или участки деятельности, на которых возникают эти риски. Существует несколько вариантов диверсификации рисков в зависимости от специфики деятельности организации и вида риска: диверсификация каналов сбыта и поставок, диверсификация видов деятельности, диверсификация инвестиций. Лимитирование же риска требует установления систем ограничений верхних и нижних пределов, способствующих уменьшению степени риска.

Основным методом принятия рисков является создание системы резервов. Данный метод подразумевает создание страховых запасов сырья, материалов, финансовых средств для снижения последствий наступления рискованных событий. Также разрабатываются планы исполь-

зования этих резервов в кризисных ситуациях. К методам принятия риска относятся стратегическое планирование и прогнозирование внешней среды.

Учитывая специфику технологического процесса и особенности деятельности генерирующих предприятий, можно сделать вывод о том, что такие методы управления рисками, как локализация рисков и диверсификация видов деятельности, не могут быть использованы при управлении рисками для данных предприятий. Аутсорсинг управления рисками тоже не применим для генерирующих предприятий в связи с большим количеством рисков деятельности и невозможностью потери контроля над процессом управления рисками специалистами энергетического профиля. Использование метода лимитирования рисков будет наиболее эффективным только при управлении финансовыми и инвестиционно-инновационными рисками для генерирующих предприятий. Наиболее часто применяемыми методами управления рисками для генерирующих предприятий будут следующие: методы уклонения от рисков, страхование, хеджирование и создание системы резервов.

Выбор метода управления риском должен опираться на особенности конкретного вида риска и сложившуюся ситуацию. Так, при очень частом проявлении риска и катастрофических потерях от данного вида риска предприятием должна быть выбрана стратегия уклонения от этого риска, тогда как при маловероятном проявлении и приемлемом уровне последствий предприятие может принимать данный

риск на себя при создании необходимого уровня резервов.

Наибольшую эффективность при управлении рисками будет иметь комбинация различных методов, которые подбираются к каждой конкретной ситуации, сложившейся в бизнес-окружении генерирующего источника.

ВЫВОДЫ

1. Среди возможных методов проведения количественной оценки рисков для энергетических предприятий наиболее подходящими будут аналитические методы и методы оценки потерь. Также может применяться метод экспертных оценок.

2. Представленная методика оценки рисков для энергетических предприятий, основанная на показателях вероятности и величины вероятных потерь от риска, является наиболее универсальным инструментом оценки последствий различных видов рисков с учетом специфики энергетических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Догиль, Л. Ф. Управление рисками и страхование в бизнесе / Л. Ф. Догиль. Минск: Мисанта, 2014. 321 с.
2. Альгин, А. Риск и его роль в общественной жизни / А. Альгин. М.: Мысль, 1989. 160 с.
3. Балабанов, И. Т. Риск-менеджмент / И. Т. Балабанов. М.: Финансы и статистика, 1996. 192 с.
4. Лапуста, М. Г. Риски в предпринимательской деятельности / М. Г. Лапуста, Л. Г. Шаршукова. М.: ИНФРА-М, 1998. 224 с.
5. Найт, Ф. Х. Риск, неопределенность и прибыль / Ф. Х. Найт, пер. с англ.; науч. ред. В. Г. Гребенников. М.: Дело, 2003. 218 с.
6. Рымкевич, В. В. Экономическая теория рисков / В. В. Рымкевич. Минск: Белорус. гос. экон. ун-т, 2001. 208 с.
7. Цай, Т. Н. Конкуренция и управление рисками на предприятиях в условиях рынка / Т. Н. Цай, П. Г. Грабовый, Марашда Басам Сайел. М.: ИНФРА-М, 1999. 286 с.
8. Любимова, Н. Г. Экономика и управление в энергетике / Н. Г. Любимова; под общ. ред. Н. Г. Любимовой, Е. С. Петровского. М.: Юрайт, 2014. 485 с.
9. Тымуль, Е. И. Риски энергетических предприятий: технологические и экономические аспекты / Е. И. Тымуль // Экономика. Управление. Инновации. 2019. Т. 5, № 1. С. 26–30.
10. Буянов, В. П. Рискология: управление рисками / В. П. Буянов, К. А. Кирсанов, Л. А. Михайлов. М.: Экзамен, 2002. 382 с.
11. Головачева, И. В. Оценка хозяйственного риска: метод. рекомендации для слушателей отделения подгот. рук. и студентов фак-та менеджмента / И. В. Головачева, Т. П. Лизунова; Акад. упр. при Совете Министров Респ. Беларусь. Минск: [б. и.], 1993. 22 с.
12. Гранатуров, В. М. Экономический риск: сущность, методы измерения, пути снижения / В. М. Гранатуров. М.: Дело и сервис, 1999. 112 с.

13. Финансовый менеджмент / под ред. Е. С. Стояновой. М.: Перспектива, 1993. 768 с.
14. Хохлов, Н. В. Управление риском / Н. В. Хохлов. М.: ЮНИТИ, 1999. 239 с.
15. Юкаева, В. С. Управленческие решения / В. С. Юкаева. М.: Дашков и К, 1999. 292 с.
16. Панюков, Д. И. Предварительное исследование объекта анализа в рамках метода FMEA / Д. И. Панюков, Е. В. Панюкова // Инновационная наука. 2015. № 11. С. 103–108.

Поступила 02.07.2020

Подписана в печать 29.10.2020

Опубликована онлайн 29.01.2021

REFERENCES

1. Dogil L. F. (2014) *Risk Management and Insurance in Business*. Minsk, Misanta Publ. 321 (in Russian).
2. Algin A. (1989) *Risk and its Role in Public Life*. Moscow, Mysl Publ. 160 (in Russian).
3. Balabanov I. T. (1996) *Risk Management*. Moscow, Finansy i Statistika Publ. 192 (in Russian).
4. Lapusta M. G., Sharshukova L. G. (1998) *Risks in Entrepreneurial Activity*. Moscow, INFRA-M Publ. 224 (in Russian).
5. Knight F. H. (2003) *Risk, Uncertainty and Profit*. Moscow, Delo Publ. 218 (in Russian).
6. Rymkevich V. V. (2001) *Economic Theory of Risks*. Minsk, Belarus State Economic University. 208 (in Russian).
7. Tsai T. N., Grabovyi P. G., Marashda Bassam Sayel (1999) *Competition and Risk Management at Enterprises in Market Conditions*. Moscow, INFRA-M Publ. 286 (in Russian).
8. Lyubimova N. G., Petrovskii E. S. (2014) *Economics and Management in Energy*. Moscow, Yurayt Publ. 485 (in Russian).
9. Tymul E. I. (2019) Risks of Energy Enterprises: Technological and Economic Aspects. *Ekonomika. Upravlenie. Innovatsii = Economics. Management. Innovations*, 5 (1), 26–30 (in Russian).
10. Buyanov V. P., Kirsanov K. A., Mikhailov L. A. (2002) *Riskology: Risk Management*. Moscow, Ekzamen Publ. 382 (in Russian).
11. Golovacheva I. V., Lizunova T. P. (1993) *Assessment of Economic Risk*. Minsk, Academy of Public Administration under the Council of Ministers of the Republic of Belarus. 22 (in Russian).
12. Granaturov V. M. (1999) *Economic Risk: Essence, Methods of Measurement, Ways of Reduction*. Moscow, Delo i Servis Publ. 112 (in Russian).
13. Stoyanova E. S. [ed.] (1993) *Financial Management*. Moscow, Perspektiva Publ. 768 (in Russian).
14. Khokhlov N. V. (1999) *Risk Management*. Moscow, UNITY Publ. 239 (in Russian).
15. Yukaeva V. S. (1999) *Management Decisions*. Moscow, Dashkov i K Publ. 292 (in Russian).
16. Panyukov D. I., Panyukova E. V. (2015) Preliminary Study of the Object of Analysis in the Framework of the FMEA Method. *Innovatsionnaya Nauka [Innovative Science]*, (11), 103–108 (in Russian).

Received: 02.07.2020

Accepted: 29.10.2020

Published online: 29.01.2021