

Для індивідуальних передплатників - 74126  
Для підприємств і організацій - 40294



ISSN 2311-4061

# ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ УКРАЇНИ

Науково-практичний журнал

## RAILWAY TRANSPORT OF UKRAINE

THE SCIENTIFIC-PRACTICAL JOURNAL



1/2022



The conceptual thrust of scientific and technical publications in this journal is based on the priorities of the JSC "Ukrzaliznytsia" activity, of the Scientific and Technical Councils of the Company and the branch "SEI" of SC "Ukrzaliznytsia" decisions.

Journal publications main directions:

- rail way transport reform;
- transport systems and logistics;
- technical politics and scientific and technical support;
- train operation and safety;
- rolling stock and infrastructural recourses;
- railway automatics, communication and informatisation;
- resource efficiency and ecology;
- railway operation practical experience.

The journal "Railway transport of Ukraine" is indexed in *Ukrainika Naukova*, *RSCI*, *Google Scholar*.

Responsibility for the accuracy of facts, quotations, proper names and other information is on the authors of publications and advertisers.

**Journal founder -  
UKRZALIZNYTSIA**  
**Publisher - The Rail Transport Scientific  
and Engineering Institute branch of SC  
"Ukrzaliznytsia" (branch "SEI")**  
Published since May 1996

Chief Editor

**Sergey Myamlin**

Deputy Chief Editor

**Sergii Gryshchenko**

Materials reprinting - only with the permission of the journal editorial staff.  
Materials are printed by the original language: Ukrainian, Russian, and English.  
Articles are reviewed. The editors not always share the opinion of the author.

**INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL**

**Vyacheslav Petrenko**, director of the branch "SEI" of SC "Ukrzaliznytsia", Ukraine (chairman of the council)

**Konstantin Bochkov**, Dr.Tech.Sc., Belarusian State University Transport, Belarus

**Gintautas Bureika**, Dr.Tech.Sc., Vilnius Technical University, Lithuania

**Mykhailo Kelrikh**, Dr.Tech.Sc., branch "SEI", SC "Ukrzaliznytsia", Ukraine

**Viktor Leonets**, Dr.Tech.Sc., Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine

**Mykhailo Makarenko**, Dr.Ec.Sc., Ukraine

**Sergey Myamlin**, Dr.Tech.Sc., SC "Ukrzaliznytsia", Ukraine

**Oleksandr Fedorenko**, Director of the Department of State Policy in the field of Rail Transport of the Ministry of Infrastructure of Ukraine

**EDITORIAL BOARD**

**Gleb Vatulya**, Dr.Tech.Sc., Ukrainian State University of Railway Transport, Ukraine

**Sergii Grishchenko**, PhD. Tech., branch "SEI", SC "Ukrzaliznytsia", Ukraine

**Eduard Danilenko**, Dr.Tech.Sc., State University of Infrastructure and Technology, Ukraine

**Valery Domanskiy**, Dr.Tech.Sc., NTU "Kharkov National University of Municipal Economy", Ukraine

**Yuriy Dyomin**, Dr.Tech.Sc, East Ukrainian National University, Ukraine

**Istvan Zobory**, Dr. Tech. Sc., Budapest University of Technology and Economics, Hungary

**Jan Kalivoda**, Dr.Tech.Sc., Czech Technical University in Prague, Czech Republic

**Sergii Kara**, PhD. Tech., branch "SEI", SC "Ukrzaliznytsia", Ukraine

**Viktor Myronenko**, Dr.Tech.Sc , State University of Infrastructure and Technology, Ukraine

**Sergii Myamlin**, Dr.Tech.Sc., SC "Ukrzaliznytsia", Ukraine

**Arthur Putsiata**, Dr.Tech.Sc., State Technical University of Gomel, Belarus

**Victor Sychenko**, Dr.Tech.Sc., branch "SEI", SC "Ukrzaliznytsia", Ukraine

**Anatoliy Falendish**, Dr.Tech.Sc., Pryazovskyi State Technical University, Ukraine

**International Standard Serial Number ISSN 2311-4061.**  
**Indexes in the Catalog of Ukrainian Publications "Press by mail":**  
**for individual persons - 74126; for legal persons – 40294.**  
**4 journals per year.**

**The address of the editorial office:**

The "RT SEI" branch of SC "Ukrzaliznytsia", 39, Ivan Fedorova Str., Kyiv, 03038, Ukraine.

Tel.: +38 (044) 309-68-93; +38 (044) 465-38-11; факс: +38 (044) 528-93-01.

E-mail: [ztu1520mm@gmail.com](mailto:ztu1520mm@gmail.com).

Web: [http://uz.gov.ua/about/activity/science/ndkti\\_uz/ztu/](http://uz.gov.ua/about/activity/science/ndkti_uz/ztu/)

**Drafting group:** Alexander Bocharov, Sergii Gryshchenko, Kateryna Dukhnenko, Alla Myrgorodska,



# «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут залізничного транспорту» - філія АТ «Укрзалізниця»

- Наукові дослідження з підтримки і розвитку залізничного транспортного комплексу та його складових
- Контроль технічного стану тягового та моторвагонного рухомого складу, пасажирських і вантажних вагонів та іншого спеціального рухомого складу методами неруйнівного контролю
- Атестація лабораторій неруйнівного контролю вагонного господарства
- Інспекторський та приймальний контроль продукції, що постачається для потреб АТ «Укрзалізниця»
- Послуги інспекційного органу з інспектування та атестації підприємств щодо експлуатації, обслуговування, ремонту складових частин, деталей, вузлів рухомого складу
- Дослідження життєвих циклів залізничного рухомого складу та розрахунків їх вартості
- Послуги з дослідження експлуатаційної надійності залізничної техніки та супроводу її впровадження
- Комплексні вимірювання фізичних величин, визначення показників безпеки руху, ходових якостей, комфортності та плавності ходу рухомого складу, його міцності, з визначенням статичних і динамічних напружень
- Проведення комплексних інженерних розрахунків з оцінки напружено-деформованого стану металевих конструкцій: статичний та динамічний розрахунок міцності, модальний аналіз власних форм і частот коливань, розрахунок втомної довговічності конструкцій
- Проведення вимірювань великогабаритних конструкцій з отриманням просторових координат конструкцій
- Надання послуг акредитованого на відповідність ДСТУ ISO/IEC 17025 Науково-впроваджувального центру філії згідно сфери акредитації
- Лабораторні дослідження якості (хімічний склад, структура, властивості) металів і сплавів, деталей, вузлів рухомого складу та елементів інфраструктури
- Здійснення випробувань та вимірювань відповідно до галузі акредитації з метою перевірки якості нафтопродуктів, вугілля, вугільних вставок, лакофарбових матеріалів, технологічних вод, електролітів, піску, чавунів та сталей, промислових стічних вод на відповідність нормативній документації, проведення досліджень складу та властивостей повітря робочої зони, важкості та напруженості праці
- Вимірювання геометричних параметрів рухомого складу та його складових частин
- Експертиза та розробка нормативно-технічної документації з експлуатації та організації ремонтів тягового та моторвагонного рухомого складу, пасажирських, вантажних та інших вагонів
- Експертиза та розробка нормативної, технічної та конструкторсько-технологічної документації для верхньої будови колії, штучних споруд, експлуатації та ремонту колійних машин і механізмів, залізничної автоматики, систем телекомунікації та енергетики
- Модернізація та ремонт несучих конструкцій тягового та моторвагонного рухомого складу
- Проектування та виготовлення нестандартного обладнання для ремонту рухомого складу
- Організація і проведення міжлабораторних порівнянь результатів вимірювань та випробувань
- Послуги архіву залізничної нормативно-конструкторської документації
- Послуги поліграфічної діяльності



**Наші контакти:**

вул.І.Федорова,39, м.Київ, 03038, Україна

Тел.: **38 (044) 465 38 10**

Факс: **38 (044) 528 93 01**

E mail: [ndkti@lotus.uz.gov.ua](mailto:ndkti@lotus.uz.gov.ua)

[www.uz.gov.ua](http://www.uz.gov.ua)

<b>НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ</b> <b>THE SCIENTIFIC-PRACTICAL JOURNAL</b>	<b>ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ УКРАЇНИ-№ 1 (142), 2022 р.</b> <b>RAILWAY TRANSPORT OF UKRAINE - № 1 (142), 2022 y.</b>
<p align="center"> <b>Засновник -</b>  <b>УКРЗАЛІЗНИЦЯ</b>  <b>Видавець - "Науково-дослідний</b>  <b>та конструкторсько-</b>  <b>технологічний інститут</b>  <b>залізничного транспорту"</b>  <b>(Філія "НДКТІ"</b>  <b>АТ "Укрзалізниця")</b> </p> <p>           Видається з травня 1996 р.            Реєстраційне свідоцтво КВ № 1429            від 10.05.95.         </p>	<div data-bbox="608 264 892 539" data-label="Image"> </div> <p align="center"> <b>ШАНОВНІ ЗАЛІЗНИЧНИКИ,</b>  <b>ЧИТАЧІ ЖУРНАЛУ «ЗАЛІЗНИЧНИЙ</b>  <b>ТРАНСПОРТ УКРАЇНИ»!</b> </p> <p>           Важкі часи переживає країна через військову агресію Російської Федерації. До війни ми мали все необхідне для того, щоб наші амбітні завдання з трансформації пасажирських та вантажних перевезень були втілені в життя. Нова команда менеджменту АТ «Укрзалізниця» мала б удосконалювати діяльність галузі, але відбулася військова агресія з боку Російської Федерації, що кардинально змінило життя не тільки галузі, а й мільйонів громадян України.         </p>
<p> <b>Головний редактор</b>            Мямлін С.В.  <b>Заступник головного редактора</b>            Грищенко С.Г.         </p>	<p>           Агресором нещадно руйнуються об'єкти залізничної інфраструктури, руйнуються залізничні мости та колійне господарство, знищується рухомий склад та наносяться ракетні і артилерійські удари по вокзалах і пасажирських поїздах. Але, не дивлячись на бойові дії та реальну загрозу, залізничники пліч-о-пліч разом із Збройними Силами України боронять нашу державу від російських загарбників. Багато залізничників пішло до лав збройних сил, значна кількість долучилася до територіальної оборони, але все ж таки основна частина залізничників виконує свої обов'язки на робочих місцях, забезпечуючи перевезення гуманітарних вантажів та евакуацію людей. Навіть, інколи, ціною власного життя.         </p>
<p>           Матеріали в журналі друкуються мовою оригіналу: українською, російською та англійською. Статті рецензуються. Відповідальність за достовірність фактів, цитат, власних імен та інших відомостей несуть автори публікацій та рекламодавці. Передрук матеріалів - тільки з дозволу редакції журналу. Індеси журналу в Каталозі передплатних видань України: для індивідуальних передплатників - 74126; для підприємств та організацій - 40294. На рік видається 4 номери журналу. Ціна договірна. Формат 60х90/8. Папір крейдований. Друк офсетний. Установчий тираж: 200 прим. Журнал надруковано у типографії ТОВ «ІДЕЯ ПРИНТ» м. Київ, вул. Пушкінська, 41.         </p>	<p>           Залізничні підприємства з виробництва та ремонту також налаштовані на забезпечення оборони держави. Виготовляються тисячі протитанкових «іжаків» та інші фортифікаційні споруди. Нажаль, на це приходится витратити й рейки, які необхідні були для оновлення залізничної інфраструктури, але, після війни, всі програми з оновлення та розвитку інфраструктури будуть не тільки поновлено, а й збільшено на якісно новому технологічному рівні. Це дозволить суттєво оновити всю транспортну інфраструктуру та вийти на нові виробничі рубежі, в тому числі й на нові транзитні маршрути і вантажопотоки.         </p> <p>           Безумовно, подальший розвиток та реформування залізничної галузі має відбуватися у розрізі розвитку всієї транспортної системи держави та з урахуванням існуючих та майбутніх викликів геополітичного характеру. Але головним пріоритетом є і буде розвиток інфраструктури залізниць загального користування для забезпечення перевезень пасажирів і вантажів на всіх напрямках на національному рівні та у міждержавному сполученні. І це має бути органічним додатком до Президентської програми «Велике будівництво». Планується продовження робіт з проектування та будівництва об'єктів залізничної інфраструктури за рахунок Державного бюджету України, і це має бути в пріоритеті на перспективу.         </p>
<p> <b>Адреса редакції:</b>            Україна, 03038, Київ,            вул. Федорова, 39, НДКТІ ЗТ,            редакція ЗТУ.            Тел.: +38 (044) 309-68-93;                  +38 (044) 465-38-11.            Факс: +38 (044) 528-93-01.            E-mail: ztu1520mm@gmail.com;  <a href="https://www.uz.gov.ua/about/activit/y/science/ndkti_uz/ztu/">https://www.uz.gov.ua/about/activit/y/science/ndkti_uz/ztu/</a>.            Цифровий ідентифікатор DOI            присвоєно виданню реєстраційним            агентством Crossref.         </p>	<p>           Тому, у науковців та інженерів галузі багато тематики для проведення досліджень з відновлення і розвитку інфраструктури та рухомого складу залізничного транспорту країни, і, сподіваюсь, відповідні пропозиції та результати їх пошукових робіт знайдуть втілення на сторінках галузевого науково-практичного журналу.         </p>
<p> <b>Над випуском працювали:</b>            Бочаров О.П., Грищенко С.Г.,            Духненко К.С., Миргородська А.І.         </p>	<p align="right"> <i>З повагою,</i>  <i>перший заступник</i>  <i>Міністра інфраструктури України</i>  <b>Василь ШКУРАКОВ</b> </p>

Концептуальна спрямованість науково-технічних публікацій у журналі формується на підставі пріоритетів діяльності АТ «Укрзалізниця», рішень Науково-технічних рад Товариства та філії "НДКТІ" АТ "Укрзалізниця". Основні напрямки публікацій журналу, це: реформування залізничного транспорту; транспортні системи і логістика; технічна політика та науково-технічне забезпечення; організація і безпека руху поїздів; рухомий склад та засоби інфраструктури; залізнична автоматика, зв'язок і інформатизація; ресурсозбереження та екологія; практичний досвід експлуатації залізниць тощо. Журнал «Залізничний транспорт України» внесено до Переліку наукових фахових видань України, наказ МОНУ № 975 від 11.07.2019 р. та включено до української загальнодержавної реферативної бази даних «Україніка наукова» і пошукової системи Google Scholar.

Використання даних державних статистичних спостережень у наукових статтях без посилання на їх джерело заборонено. При використанні чи передруку матеріалів журналу «Залізничний транспорт України» посилання на видання є обов'язковим.

## МІЖНАРОДНА РЕДАКЦІЙНА РАДА

БОЧКОВ К.А., докт. техн. наук,  
Професор Білоруського  
державного університету  
транспорту (Республіка Білорусь)  
БУРЕЙКА Г., докт. техн. наук,  
професор Вільнюського  
технічного університету  
ім.Гедімінаса (Литва)  
ПЕТРЕНКО В.О., перший заступник  
директора філії «НДКТІ» АТ  
«Укрзалізниця» (голова ради)

КЕЛЬРІХ М.Б., докт. техн. наук,  
професор, науковий радник  
директора філії «НДКТІ»  
АТ«Укрзалізниця» (Україна)  
ЛЕОНЕЦЬ В.А., докт. техн. наук  
провідний науковий співробітник  
Інституту проблем міцності імені  
Г.С. Писаренка НАНУ (Україна)  
МАКАРЕНКО М.В., докт. екон. наук,  
професор (Україна)

МЯМЛІН С.В., докт. техн. наук,  
професор, директор філії «Центр  
діагностики залізничної  
інфраструктури»  
АТ «Укрзалізниця» (Україна)  
ФЕДОРЕНКО О.Г., генеральний  
директор Директорату залізничного  
транспорту Міністерства  
інфраструктури України (Україна)

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

ВАТУЛЯ Г.Л., докт. техн. наук,  
професор, проректор з наукової  
роботи Українського державного  
університету залізничного транспорту  
(Україна)  
ГРИЩЕНКО С.Г., канд. техн. наук,  
доцент, помічник директора філії  
«НДКТІ» АТ «Укрзалізниця»  
(заступник головного редактора)  
ДАНИЛЕНКО Е.І., докт. техн. наук,  
професор, завідувач кафедри  
«Залізнична колія та колійне  
господарство» Державного  
університету інфраструктури та  
технологій (Україна)  
ДОМАНСЬКИЙ В.Т., докт. техн. наук,  
професор кафедри «Електричний  
транспорт» Харківського  
національного університету міського  
господарства ім. О.М. Бекетова  
(Україна)

ДЬОМІН Ю.В., докт. техн. наук,  
професор кафедри «Залізничний,  
автомобільний транспорт та  
підйомно-транспортні машини»  
Східноукраїнського національного  
університету ім. В. Даля (Україна)  
ЗОБОРІ Іштван, докт. техн. наук,  
професор Будапештського  
технологічного та економічного  
університету (Угорщина)  
КАЛІВОДА Ян, канд. техн. наук,  
ас. проф. Чеського технічного  
університету в Празі (Чехія)  
КАРА С.В., канд. техн. наук, начальник  
Управління інжинірингу Науково-  
впроваджувального центру філії  
«НДКТІ» АТ «Укрзалізниця» (Україна)  
МИРОНЕНКО В.К., докт. техн. наук,  
професор, завідувач кафедри  
«Управління комерційною діяльністю  
залізниць» Державного університету  
інфраструктури та технологій  
(Україна)

МЯМЛІН С.В., докт. техн. наук,  
професор, директор філії «Центр  
діагностики залізничної  
інфраструктури» АТ «Укрзалізниця»  
(головний редактор)  
ПУТЯТО А.В., докт. техн. наук,  
доцент, ректор Гомельського  
государственного технического  
университета имени П.О. Сухого  
(Республіка Білорусь)  
СИЧЕНКО В.Г., докт. техн. наук,  
професор, заступник директора  
філії «Центр діагностики залізничної  
інфраструктури» АТ «Укрзалізниця»  
(Україна)  
ФАЛЕНДИШ А.П., докт. техн. наук,  
професор, завідувач кафедри  
«Транспортні технології підприємств»  
Приазовського державного  
технічного університету (Україна)

<b>ЗМІСТ</b> ...	<b>CONTENTS</b> ...
<b>Модернізація та ремонт</b> ...	<b>Modernization and repairing</b> ...
<b>Путятю А.В.</b> Оценка ресурса несущих конструкций вагонов метрополитена моделей 81-717 и 81-714 после длительной эксплуатации .....4	<b>A. Putsiata</b> Estimate the resource of constructions subway cars models 81-717 и 81-714 after long-term operation .....4
<b>Інфраструктура</b> ...	<b>Infrastructure</b> ...
<b>Демченко С.М., Татуревич А.А., Макаров Ю.О.</b> Впровадження нових конструкцій пружних рейкових скріплень на залізницях України .....14	<b>S. Demchenko, A. Taturevich, Yu. Makarov</b> Introduction of new designs of elastic rail fastenings on the railways of Ukraine .....14
<b>Надійність та менеджмент якості</b> ...	<b>Reliability and quality management</b> ...
<b>Варбанець Р.А., Мальчевський В.П., Кучеренко Ю.М., Мінчев Д.С., Кирнац В.І., Бондаренко В.В.</b> Діагностика робочого процесу двотактних двигунів MAN B&W .....20	<b>R. Varbanets, V. Malchevsky, Yu. Kucherenko, D. Minchev, V. Kirnats, V. Bondarenko</b> MAN B&W 2-stroke marine engines performance analysis .....20
<b>Капіца М.І., Бобирь Д.В., Кислий Д.М., Богомолов А.Р.</b> Розробка електронної частини комплексу для визначення технічного стану циліндропоршневої групи дизеля .....26	<b>M. Kapitsa, D. Bobyr, D. Kyslyi, A. Bohomolov</b> Development of the electronic part of the complex for determining the technical condition of the cylinder-piston group of the diesel engine .....26
<b>Моделі та моделювання</b> ...	<b>Models and modelling</b> ...
<b>Зонов В.Д., Матяш В.О., Белоус Ю.А., Польников Ю.В., Левцов В.Б.</b> Исследование колебаний в электронной системе регулирования тепловозного дизеля на установившихся и переходных режимах .....35	<b>V. Zonov, V. Matyash, Y. Belous, Yu. Polnikov, V. Levtsov</b> Research of vibrations in the electronic system of adjusting of diesel of diesel engine on the modes that was set and transitional .....35
<b>Ресурсозбереження і екологія</b> ...	<b>Resource and ecology</b> ..
<b>Гайденок О.С., Голуб Г.М., Кульбовський І.І., Штомпель Ю.М.</b> Дослідження ефективності архітектур штучних нейронних мереж для прогнозу електроспоживання залізниць .....45	<b>O. Haidenko, H. Holub, I. Kulbovskyi, Yu. Shtompel</b> Research of artificial neural networks architectures efficiency for railways electric consumption forecast.....45
<b>Сторінки історії</b> ..	<b>Chapter of history</b> ...
<b>Мямлин С. В.</b> Иштван Зобори – ученый и организатор науки .....51	<b>S. Myamlin</b> Istvan Zobori - scientist and organizer of science.....51
<b>Технічна політика</b> ...	<b>Technical policy</b> ...
<b>Татур О.К.</b> Новини стандартизації.....55	<b>O. Tatur</b> Standardisation news.....55
Реферати .....56	Abstracts .....56



*Доктор техн. наук Путятю А. В.*

## **ОЦЕНКА РЕСУРСА НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ВАГОНОВ МЕТРОПОЛИТЕНА МОДЕЛЕЙ 81-717 И 81-714 ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

**Ключевые слова:** вагоны метрополитена, несущая конструкция, длительная эксплуатация, прочность, метод конечных элементов, испытания, тензометрирование, напряжения, остаточный ресурс.

### **Введение**

Регулярное движение поездов Минского метрополитена было открыто 30 июня 1984 года. В настоящее время эксплуатационная длина трех линий в двухпутном исчислении составляет 40,8 км с 33 станциями. Инвентарный парк вагонов составляет 390 единиц, из которых сформированы 79 составов: 73 пятивагонных и 6 четырехвагонных. Следует отметить, что из указанного числа вагонов порядка 10% – вагоны производства компании Stadler, введенные в эксплуатацию в ноябре 2020 года, с открытием третьей линии метро.

Первые поезда состояли из вагонов моделей 81-717 (головной) и 81-714 (промежуточный), общий вид которых приведен на рисунке 1.



*Рис. 1 – Головной и промежуточный вагоны моделей 81-717 и 81-714*

Срок службы указанного подвижного состава, назначенный заводом-изготовителем, составляет 31 год и в последние годы интенсивно достигается эксплуатируемыми вагонами. В то же время, учитывая практику эксплуатации (вагоны курсируют по одному маршруту) и ремонта вагонов (обслуживаются в одном депо), а также отсутствие отказов металлоконструкций вагонов есть основания предполагать, что ресурс их несущих конструкций не исчерпан.

Процедура оценки остаточного ресурса несущих конструкций нашла широкое применение при обосновании безопасной эксплуатации железнодорожного подвижного состава, нормативный срок службы которых истек. Так, в процессе длительной эксплуатации подвижного состава возникают коррозионные повреждения несущих элементов кузовов, вследствие чего происходит изменение геометрических характеристик сечений, а, следовательно, и прочности кузова в целом. В этом случае для обоснования продления срока службы кузовов вагонов необходимо прогнозирование их остаточного ресурса. Исследованиями в этом направлении занимались

научные школы железнодорожников многих организаций стран содружества [11, 14, 15, 17]. Так достаточно широко вопросы продления срока службы вагонам аккумулированы в монографии Третьякова А.В. [15]. Автором предложен расчетно-экспертно-статистический метод (РЭС-метод) управления индивидуальным ресурсом вагона в эксплуатации.

Отметим, что расчетно-экспериментальный подход нашел весьма широкое применение при научном обосновании остаточного ресурса многих типов и моделей вагонов. В работе Воiko А. [16] на основании расчетов прочности, а также по критерию многоциклового усталости выполнена оценка остаточного ресурса и предложены конструктивные решения по усилению несущей конструкции рамы вагона-цистерны для перевозки нефтепродуктов. В работе Зимаковой М.В. [4] оценку остаточного ресурса вагонов-цистерн предлагается выполнять с учетом изменения ударной вязкости материала несущей конструкции. При этом учитывалась динамика изменения ударной вязкости в зависимости от времени и климатических условий эксплуатации вагона-цистерны, а также коррозионный износ.

В работе Кельриха М.Б., Брайковской Н.С., Прокопенко П.Н. [6] также применен расчетно-экспериментальный метод оценки ресурса, основанный на теории линейного суммирования повреждений по критерию многоциклового усталости материала, но с учетом различных конструктивных особенностей вагонов-цистерн, в частности, рамного и безрамного исполнения, наличия шпангоутов и т.п.

Среди работ, связанных с оценкой остаточного ресурса кузовов пассажирских вагонов, следует также отметить работы Сенько В.И. и его учеников [14], где за основной критерий, определяющий ресурс, принимался коррозионный износ. В работе приведены исследования поэтапного влияния коррозионного износа материала на несущую способность кузовов пассажирских вагонов. В качестве объектов исследования были выбраны кузова пассажирских вагонов после истечения нормативного срока службы. В работе предложена дифференцированная оценка предельных значений толщины основных элементов кузовов. При этом в качестве предельного состояния элементов кузова предлагается считать потерю их несущей способности – прочности или устойчивости. Вопросы оценки ресурса и продления сроков службы различных моделей пассажирских вагонов рассмотрены также в работах [5, 13].

В работах [1, 7] для оценки и прогнозирования ресурса несущих конструкций вагонов предлагается использовать методы компьютерного моделирования, позволяющие смоделировать более широкий спектр динамических нагрузок на вагон. В тоже время в диссертационной работе [8] отмечено, что, несмотря на постоянное совершенствование методов прочностных расчетов, имеют место конструктивные области, где расчетную оценку остаточного ресурса выполнить затруднительно. Поэтому экспериментальные оценки подвижного состава являются единственным методом подтверждения конструкции подвижного состава нормативным требованиям. В работе проведен сравнительный анализ результатов прочностных расчетов с экспериментальными результатами комплексных нормативных испытаний кузовов пассажирских вагонов после ремонта. Достаточно большое число работ посвящено продлению срока службы тягового подвижного состава [3, 9, 12, 17], в том числе вагонов метрополитена [2].

Результаты приведенных выше исследований показывают, что простое продление срока службы реализуется только в случае неполного израсходования остаточного ресурса. Значительно чаще для продления срока службы требуется проведение дополнительных ремонтных или модернизационных работ, в том числе и в связи с моральным старением подвижного состава. Следует отметить, что выводы о необходимости усиления и восстановления металлоконструкций вагонов диктуются отсутствием или потребностью увеличения остаточного ресурса ввиду неудовлетворительного технического состояния несущих конструкций подвижного состава, наряду с высокой интенсивностью его эксплуатации.

Таким образом, анализ публикаций, посвященных проблеме оценки остаточного ресурса несущих конструкций железнодорожного подвижного состава, позволяет предложить следующие этапы работ для оценки ресурса несущих конструкций вагонов метрополитена:

- изучение технической документации, условий эксплуатации, анализ информации по проведению технических освидетельствований и ремонтов вагонов;
- разработка диагностических карт несущей конструкции вагона, выполнение визуального контроля, измерение толщин элементов конструкции, контроль сварных швов и основного

металла, отбраковка вагонов, а также отбор образца с худшим техническим состоянием для проведения испытаний;

- разработка компьютерных моделей и выполнение виртуальных испытаний вагона с учетом фактических значений толщин элементов конструкции для определения соответствия деградированной конструкции требованиям актуальной нормативной документации;
- проведение натурных контрольных испытаний несущей конструкции вагона при характерных режимах нагружения;
- оценка остаточного ресурса несущей конструкции вагона.

### **Оценка технического состояния вагонов после длительной эксплуатации**

На первом этапе обоснования возможности дальнейшей безопасной эксплуатации вагонов после выработки срока службы, установленного заводом-изготовителем, выполнена оценка технического состояния их несущих конструкций. Фактическое техническое состояние металлоконструкций вагонов было установлено специалистами отраслевой научно-исследовательской лаборатории «Технические и технологические оценки ресурса единиц подвижного состава» БелГУТ методами неразрушающего контроля: визуальный и ультразвуковая толщинометрия. С целью структуризации результатов обследования технического состояния разработано два комплекта диагностических карт (для головного вагона модели 81-717 и промежуточного модели 81-714), включающие основные конструктивные элементы металлоконструкции вагонов: рама, боковые стены, торцевые стены, крыша. Измерение остаточной толщины элементов выполнялось на ремонтных позициях после зачистки мест под контрольные точки.

По результатам обследования технического состояния металлоконструкций более чем 70 вагонов установлено, что коррозионный износ не превышает 7 % от номинальных значений конструктивных элементов. В тоже время визуальный контроль несущих конструкций позволил выявить ряд конструктивных областей и элементов, для которых характерно появление трещин в процессе эксплуатации:

- зона крепления сцепного устройства на хребтовой балке (рис. 2 а);
- вертикальные листы шкворневой балки по границам отверстий (рис. 2 б);
- кронштейны крепления подвески автосцепки (рис. 2 в);
- вертикальные стенки продольных балок, за шкворневой балкой.



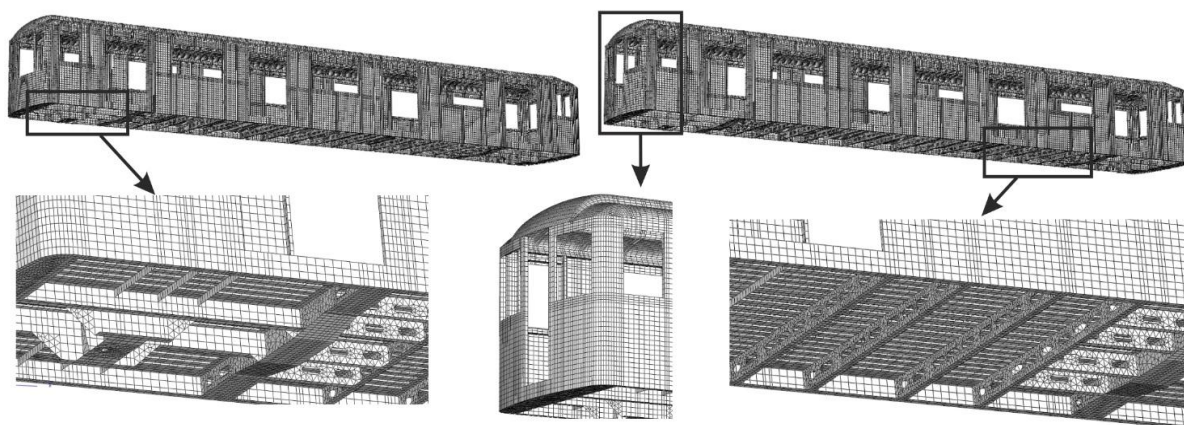
*Рис. 2 – Эксплуатационные повреждения элементов несущих конструкций вагонов моделей 81-717 и 81-714: а) – трещина в хребтовой балке в районе крепления сцепного устройства; б) – трещина в вертикальном листе шкворневой балки; в) – трещина кронштейна крепления подвески автосцепки*

### **Разработка конечно-элементных моделей**

На основе комплектов конструкторской документации на вагоны, а также с учетом результатов технического обследования их металлоконструкций были разработаны конечно-элементные модели кузовов вагонов. Использованы два типа конечных элементов: плоские пластинчатые 3-х и 4-х узловые. Для повышения точности получения результатов сетка конечных элементов строилась регулярной, тем самым, исключая появление в моделях элементов с критическими соотношениями линейных и угловых размеров конечных элементов. Таким образом, расчетная модель головного вагона представлена 192309 конечными элементами, промежуточного вагона – 192614.



Несущие элементы кузовов вагонов изготовлены из Ст3. Модуль Юнга принят равным 210 ГПа, коэффициент Пуассона - 0,3. Полученные конечно-элементные модели металлоконструкций головного и промежуточного вагонов моделей 81-717 и 81-714 приведены на рисунке 3.



*Рис. 3 – Конечно-элементные модели вагонов метрополитена модели 81-717/714*

Кинематические граничные условия включают в себя ограничение степеней свободы в местах крепления в кузовах вагонов упоров сцепного устройства и пятников. При подготовке модели были учтены также места крепления подвагонного оборудования. Силовые граничные условия для оценки прочности приняты в соответствии с действующими Нормами [10] и представляют собой системы вертикальных, боковых и продольных сил.

Вертикальные силы состоят из собственной силы тяжести полностью оборудованного вагона и силы тяжести пассажиров при максимальной населенности. Расчетная масса пассажира с багажом принималась равной 70 кг. Максимальное количество пассажиров в вагоне, определяется количеством сидящих пассажиров, а также стоящих пассажиров из расчета 10 человек на 1 м<sup>2</sup> свободной от сидений площади, за исключением участков шириной 100 мм от края сидения.

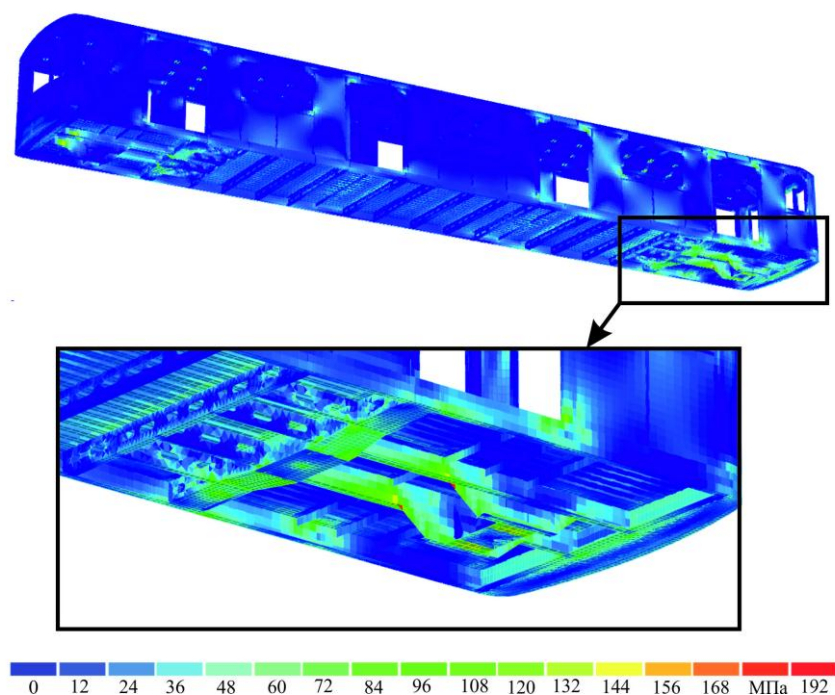
Динамические составляющие вертикальной силы от колебаний кузова на рессорном подвешивании определялись умножением силы тяжести кузова на расчетное значение показателя отношения динамической составляющей вертикальной силы к максимальной статической нагрузке во второй ступени рессорного подвешивания, который равен 0,2.

Центробежная сила для кузова определена, исходя из непогашенного ускорения, равного 0,7 м/с<sup>2</sup>. Сила давления ветра получена из расчета удельного давления ветра на боковую проекцию кузова, равного 300 Н/м<sup>2</sup>. Силы взаимодействия между вагонами приложены по оси сцепного устройства, по двум расчетным схемам: с обоих концов вагона, с одного конца. Последние уравновешены силами инерции вагона. Продольные силы, действующие на кузов: для I режима – усилие сжатия 0,4 МН (для консольной части 0,5 МН) и усилие растяжения 0,3 МН; для II режима – усилие сжатия 0,12 МН и усилие растяжения 0,12 МН.

Силы инерции, действующие на отдельные узлы и элементы вагона, приложены к центрам тяжести их масс. Инерционные силы для расчета узлов связи кузова с тележкой определялись исходя из ускорения массы тележки вдоль оси пути, равного 2 g для моторных и 4 g для немоторных тележек.

#### **Результаты оценки прочности при фактическом состоянии вагонов**

Комплекс расчетов металлоконструкций головного и промежуточного вагонов на прочность проводился для описанных режимов нагружения. Для примера, на рисунке 4 приведена полученная картина распределения эквивалентных напряжений по Мизесу для головного вагона при действии нагрузок, характерных для I режима нагружения при действии сжимающих продольных сил.



*Рис. 4 – Распределение эквивалентных напряжений в кузове головного вагона при I режиме нагружения (сжатие)*

Результаты расчетов на прочность головного вагона показали, что при первом режиме нагружения наибольшие напряжения возникают в хребтовой балке, причем при действии продольных сжимающих нагрузок они близки к допускаемым. Наибольшие напряжения в элементах шкворневой балки не превышают 150 МПа, причем наблюдается их концентрация вблизи границ отверстий на обоих вертикальных листах. В элементах боковых балок напряжения не превышают 48 % от допускаемых значений. В обшивке боковой стены максимальные напряжения составляют 177,5 МПа. Уровень напряжений в дугах крыши не превышает 87 % от допускаемого значения. Наибольшие напряжения при втором режиме нагружения возникают в шкворневой балке, где их значения составили 88 % от допускаемых. Следует отметить, что напряжения концентрируются на внутреннем листе в зоне сочленения с продольными балками и местах расположения отверстий. Наибольшие напряжения в элементах хребтовой балки не превышают 66,65 МПа. В элементах продольных балок напряжения не превышают 50 % от допускаемых значений. В элементах каркаса боковой стены максимальные напряжения возникают в дверных стойках и составляют 70,95 МПа. Уровень напряжений в обшивке крыши не превышает 39 % от допускаемого значения. Уровень напряжений в дугах крыши не превышает 85 % от допускаемого.

Аналогичный комплекс расчетов выполнен для промежуточного вагона. Получено, что наибольшие напряжения при первом режиме возникают в хребтовой балке, где расчетные напряжения составили 97 % от допускаемого значения. Наибольшие напряжения в элементах шкворневой балки не превышают 144 МПа и, также как и в головном вагоне, сконцентрированы по границам отверстий на обоих вертикальных листах. В элементах боковых балок напряжения не превышают 48 % от допускаемых значений. В элементах обшивки боковой стены максимальные напряжения составляют 177,5 МПа. Уровень напряжений в дугах крыши не превышает 86 % от допускаемого значения. При нагружении по второму режиму установлено, что наибольшие напряжения возникают в шкворневой балке, где их значения составили 87 % от допускаемых. Напряжения концентрируются на внутреннем листе в зоне сочленения с продольными балками и местах расположения отверстий. Напряженное состояние хребтовой балки промежуточного вагона практически не отличается от напряженного состояния балки головного вагона. В элементах продольных балок напряжения не превышают 46 % от допускаемых значений. В элементах каркаса боковой стены максимальные напряжения возникают в дверных стойках и составляют 68

МПа. Уровень напряжений в обшивке крыши не превышает 36 % от допускаемого значения. В целом можно отметить, что несущие конструкции вагонов моделей 81-717 (головной вагон) и 81-714 (промежуточный вагон) после их длительной эксплуатации соответствуют требованиям прочности, установленным в Нормам [10].

#### **Результаты экспериментальных исследований**

Выполненные расчеты прочности кузовов вагонов позволили разработать схемы установки тензометрических датчиков Т1...Т28 для натурных испытаний в наиболее нагруженных областях конструкции. Фрагменты расположения тензодатчиков на металлоконструкции вагона и их нумерация приведены на рисунке 5.

Динамические прочностные испытания проводились в составе опытного поезда, составленного из головного вагона модели 81-717, промежуточного вагона модели 81-714 и хвостового вагона метрополитена модели 81-717. Вагоны загружались балластом до полной грузоподъемности. Измерения динамических напряжений в элементах металлоконструкции вагона метрополитена проводились:

- на прямых участках пути со скоростями 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 км/ч;
- на кривых участках со скоростями 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 км/ч;
- при торможении до полной остановки со скоростями: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 км/ч.

Регистрация показателей в измеряемых процессах производилась кадрами различной длительности, в зависимости от длины опытного участка пути и скорости движения опытного состава. При обработке зарегистрированных процессов, для каждого из них по каждому кадру выделялся характерный участок пути: прямая, кривая и торможение до полной остановки. Доля времени измерений, приходящаяся на эксплуатацию в режиме «тяга» составила 0,325; в режиме «торможение» – 0,325; в режиме «движение в кривой» – 0,35.



*Рис. 5 – Фрагменты расположения тензодатчиков на металлоконструкциях вагонов модели 81-717/714*

Дополнительно были проведены испытания вагонов по их сбросу с клиньев, при которых регистрировался прогиб рессорного подвешивания, необходимый для определения коэффициента вертикальной динамики вагона и частоты колебания кузова.

В результате обработки экспериментальных данных получены массивы амплитудных значений напряжений для каждой контрольной точки кузова вагона, при различных режимах



эксплуатации и диапазонов скоростей движения. Фрагменты полученных результатов для головного вагона, на примере датчика Т6, установленного на нижней полке хребтовой балки вблизи сочленения со шкворневой, приведены в таблицах 1 и 2.

Табл. 1 – Промежуточные результаты напряжений в кузове головного вагона

Тензодатчик	$\sigma_i$ , МПа	$V_i$ , км/ч							
		10	20	30	40	50	60	70	80
Т6	режим «тяга»								
	$\sigma_{\max}$	31,05	37,25	44,05	38,55	38,35	49,25	54,05	53,75
	$\sigma_{\min}$	29,25	25,95	23,65	19,65	21,45	17,25	18,65	29,45
	$\sigma_a^{исп}$	0,90	5,65	10,20	9,45	8,45	16,00	17,70	12,15
	$\sigma_m^{исп}$	30,15	31,60	33,85	29,10	29,90	33,25	36,35	41,60
	$\sigma_a$	9,945	15,13	20,355	18,18	17,42	25,975	28,605	24,63
	режим «кривая»								
	$\sigma_{\max}$	30,25	33,45	34,25	45,05	40,45	41,95	34,45	44,85
	$\sigma_{\min}$	21,55	27,65	33,25	29,45	20,75	22,95	20,15	20,35
	$\sigma_a^{исп}$	4,35	2,90	0,50	7,80	9,85	9,50	7,15	12,25
	$\sigma_m^{исп}$	25,90	30,55	33,75	37,25	30,60	32,45	27,30	32,6
	$\sigma_a$	12,12	12,065	10,625	18,975	19,03	19,235	15,34	22,03
	режим «торможение»								
	$\sigma_{\max}$	34,85	37,75	31,15	58,15	60,65	39,35	41,85	29,85
	$\sigma_{\min}$	18,25	30,45	15,55	33,55	34,25	24,55	11,85	13,75
	$\sigma_a^{исп}$	8,30	3,65	7,8	12,30	13,20	7,40	15,00	8,05
	$\sigma_m^{исп}$	26,55	34,10	23,35	45,85	47,45	31,95	26,85	21,80
	$\sigma_a$	16,265	13,88	14,805	26,055	27,435	16,985	23,055	14,59

Табл. 2 – Плотность распределения амплитуд динамических напряжений в кузове головного вагона

	Диапазоны напряжений, МПа							
	от 0 до 5	от 5 до 10	от 10 до 15	от 15 до 20	от 20 до 25	от 25 до 30	от 30 до 35	от 35 до 40
Т6	режим «тяга»							
		0,125		0,375	0,25	0,25		
	режим «кривая»							
			0,375	0,5	0,125			
	режим «торможение»							
			0,375	0,25	0,125	0,25		

В таблице 1 приведены:  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\min}$  – значения максимальных и минимальных динамических напряжений в контрольной точке;  $\sigma_a^{исп}$  – амплитуда динамического напряжения, полученная по результатам испытаний при несимметричном цикле нагружения;  $\sigma_m^{исп}$  – среднее напряжение цикла;  $\sigma_a$  – амплитуда динамического напряжения, приведенная к эквивалентному симметричному циклу.

#### Оценка остаточного ресурса кузова вагона метрополитена

Расчеты остаточного ресурса кузовов вагонов моделей 81-717 и 81-714 выполнены с учетом следующих допущений:

- усталостное повреждение или разрушение материала вагона в основном происходит при упругом деформировании;
- параметром, определяющим циклическую прочность, являлся коэффициент запаса сопротивления усталости;
- справедлива линейная гипотеза суммирования усталостных повреждений;

– для неустановившегося режима нагружения амплитудные значения динамических напряжений приводятся к эквивалентному симметричному циклу.

Коэффициент запаса сопротивления усталости определяется по формуле

$$n = \frac{\sigma_{a,N}}{\sigma_{a,\varepsilon}} \geq [n], \quad (1)$$

где:  $\sigma_{a,N}$  – предел выносливости (по амплитуде) для контрольной зоны при симметричном цикле и установившемся режиме нагружения при базовом числе циклов  $N_0 = 10^7$ ;

$\sigma_{a,\varepsilon}$  – величина амплитуды динамического напряжения условного симметричного цикла, приведенная к базовому числу циклов  $N_0$ , эквивалентная повреждающему воздействию реального режима эксплуатационных напряжений за расчетный срок службы;

$[n]$  – минимально допустимый коэффициент запаса сопротивления усталости за выбранный срок службы, принимается в соответствии с данными проведенных исследований [1].

Расчетное значение  $\sigma_{a,N}$  определяется с учетом снижения предела выносливости в выбранной контрольной зоне по отношению к пределу выносливости гладкого стандартного образца согласно [10]. Таким образом,  $\sigma_{a,\varepsilon}$  – параметр, включающий в себя срок службы металлоконструкции вагона. Для его определения при  $k$  режимах нагружения воспользуемся формулой

$$\sigma_{a,\varepsilon} = m \sqrt{\sum_k \left[ \frac{N_c^k}{N_0} \sum_i (\sigma_{ai}^k)^m \cdot p_i^k \right]}, \quad (2)$$

где:  $m$  – показатель степени в уравнении кривой усталости, в амплитудах;

$N_c^k$  – суммарное число циклов динамических напряжений за расчетный срок службы кузова для  $k$ -го режима нагружения;

$N_0$  – базовое число циклов;

$\sigma_{ai}^k$  – уровень амплитуд напряжений в  $i$ -ом интервале  $k$ -го режима нагружения;

$p_i^k$  – вероятность (частость) действия уровня амплитуд  $\sigma_{a,\varepsilon}$  в  $i$ -ом интервале  $k$ -го режима нагружения.

Суммарное число циклов для  $k$ -го режима представим в виде

$$N_c^k = K_k T_p, \quad (3)$$

где:  $K_k$  – коэффициент, связывающий суммарное число циклов динамических напряжений с расчетным суммарным сроком службы для  $k$ -го режима нагружения;

$T_p$  – суммарный расчетный срок службы.

Амплитудные значения динамических напряжений для неустановившегося режима нагружения, полученные по результатам натурных испытаний продлеваемого вагона, приводятся к эквивалентному симметричному циклу по формуле

$$\sigma_a = \sigma_a^{ucn} + \psi \sigma_m^{ucn}, \quad (4)$$

где:  $\sigma_a^{ucn}$  – амплитуда динамического напряжения, полученная по результатам испытаний при несимметричном цикле нагружения;

$\psi$  – коэффициент чувствительности асимметрии цикла нагружения;

$\sigma_m^{ucn}$  – среднее напряжение цикла, полученное по результатам испытаний.

Таким образом:

$$\left( \frac{\sigma_{a,N}}{[n]} \right)^m = \sum_k \left[ \frac{K_k T_p}{N_0} \sum_i (\sigma_{ai}^k)^m \cdot p_i^k \right]; \quad (5)$$

$$T_p = N_0 \frac{\left( \frac{\sigma_{a,N}}{[n]} \right)^m}{\sum_k \left[ K_k \sum_i (\sigma_{ai}^k)^m \cdot p_i^k \right]}. \quad (6)$$

По результатам экспериментальных исследований получены значения остаточного ресурса

металлоконструкций кузовов вагонов в контрольных областях, которые сведены в таблицу 3. Результаты для конструктивных зон, в которых значения остаточного ресурса оказались равными более 100 лет в таблице не приведены.

*Табл. 3 – Результаты оценки остаточного ресурса вагонов метрополитена моделей 81-717 и 81-714*

№ точки	Долговечность, лет		№ точки	Долговечность, лет	
	вагон 81-717	вагон 81-714		вагон 81-717	вагон 81-714
T3	–	79,34	T8	–	47,34
T4	–	63,34	T12	98,51	–
T5	13,04	5,99	T13	39,84	82,32
T6	15,74	–	T16	–	45,97
T7	55,88	93,89	T18		82,65

Таким образом, по результатам расчетно-экспериментальной оценки долговечности по критерию усталостной прочности металлоконструкция вагона метрополитена, с учетом специфики его эксплуатации, обладает остаточным ресурсом не менее 5 лет.

### **Выводы**

1. В рамках реализации процедуры оценки остаточного ресурса несущих конструкций вагонов метрополитена после выработки ими срока службы выполнено обследование их технического состояния и получены значения остаточных толщин конструктивных элементов металлоконструкций кузовов. Установлено, что их коррозионный износ, в среднем, не превышает 7 % от номинальных значений.

2. Разработаны параметрические конечно-элементные модели металлоконструкций кузовов вагонов моделей 81-717 (головной вагон) и 81-714 (промежуточный вагон), имеющие возможность дифференцированного учета утонения их конструктивных элементов.

3. Выполнен комплекс расчетов напряженно-деформированного состояния конструкций кузовов головного и промежуточного вагона, при их фактическом техническом состоянии, на нагрузки регламентированные актуальной нормативной документацией. Установлено, что с учетом выявленных значений коррозионного износа несущие конструкции вагонов метрополитена соответствуют требованиям прочности.

4. Выполнены экспериментальные исследования напряженного состояния кузовов головного и промежуточного вагонов метрополитена после длительной эксплуатации и получены массивы динамических напряжений в конструктивных элементах кузовов вагонов при различных режимах эксплуатации. Полученные значения амплитудных напряжений не превышают допускаемого уровня установленного нормативной документацией.

5. Расчетно-экспериментальная оценка остаточного ресурса металлоконструкций кузовов вагонов метрополитена моделей 81-714 и 81-717 после их длительной эксплуатации показала, что после выработки вагонами нормативного срока службы, их несущие конструкции, исходя из критерия усталостной прочности, могут эксплуатироваться 5 лет.

### **Литература**

1. Антипин Д. Я. Прогнозирование ресурса рамы универсального вагона-платформы с использованием современных элементов САПР / Д. Я Антипин, А. М. Высоцкий, Е. В. Колчина // САПР и моделирование в современной электронике : II Междунар. науч.-практ. конф. Брянск, 24-25 октября 2018 г. : сб. тр. / Брянский гос. техн. ун-т ; под ред. Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина. – Брянск, 2018. – С. 3–6.

2. Борисов С.В. Прогнозирование остаточного ресурса и продление срока службы вагонов метрополитена: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук / С.В. Борисов; ПГУПС. – СПб., 2006. – 168 с.

3. Григорьев П.С. Прогнозирование остаточного ресурса рам промышленных тепловозов: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук / П.С. Григорьев; МГУПС. – М., 2016. – 150 с.

4. Зимакова М.В. Продление срока службы вагонов-цистерн с учетом изменения физико-



механических свойств металлоконструкций базовых узлов: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук / М.В. Зимакова; ПГУПС. – СПб., 2012. – 144 с.

5. Дэмбэрэлсурен О. Оценка остаточного ресурса и продление сроков службы пассажирских вагонов УБЖД / О. Дэмбэрэлсурен // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2014. – № 3 (43). – С. 97–103.

6. Кельрих М. Б. Особенности проведения исследований по продлению назначенного срока службы вагонов-цистерн для перевозки легких порошкообразных грузов / М. Б. Кельрих, Н. С. Брайковская, П. Н. Прокопенко // Проблемы безопасности на транспорте : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. : под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2019. – С. 158–160.

7. Кобищанов В. В. Оценка усталостной долговечности сварных несущих конструкций вагонов с учетом живучести / В. В. Кобищанов, Д. Я. Антипин // Тяжелое машиностроение. – 2006. – № 11. – С. 14–17.

8. Коршунов С. Д. Совершенствование методов оценки несущей способности и остаточного ресурса кузовов пассажирских вагонов после ремонта : дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук : 05.22.07 / С. Д. Коршунов. – Брянск, 2014. – 171 с.

9. Модернизация маневровых тепловозов с продлением срока службы / Г. М. Волохов [и др.] // Локомотив. – 2019. – № 4 (748). – С. 32–34.

10. Нормы для проектирования, расчета и оценки прочности и динамики механической части вагонов метрополитена колеи 1520 мм / СТО СДС ОПЖТ. – М., 2010. – 120 с.

11. О корректировке «Положения о продлении срока службы грузовых вагонов, курсирующих в международном сообщении» / Ю. П. Бороненко [и др.] // Евразия Вести. – 2012. – № X. – С. 13–14.

12. Оганьян Э. С. О порядке обновления парка и продления сроков службы локомотивов и их основного оборудования / Э. С. Оганьян, Г. М. Волохов, Г. И. Гаджиметов // Железнодорожный транспорт. – 2018. – № 3. – С. 69–71.

13. Разработка рекомендаций по продлению срока полезной эксплуатации пассажирских вагонов / С. В. Мямлин [и др.] // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6 (60). – С. 118–126.

14. Сенько В. И. Комплексная оценка остаточной несущей способности кузовов пассажирских вагонов / В. И. Сенько, А. В. Пигунов. – Гомель : БелГУТ, 2004. – 127 с.

15. Третьяков А. В. Управление индивидуальным ресурсом вагонов в эксплуатации: [монография] / А. В. Третьяков. – СПб. : ООО "Издательство ОМ-Пресс", 2004. – 348 с.

16. Boiko A. Assessment of remaining resource of tank wagons with expired life time: Summary of Doctoral Dissertation: Engineering sciences / A. Boiko; Riga Technical University. – Riga., – 2013. – 39 p.

17. Gorobets V. L. Operation characteristics of electric trains ER1, ER2 beyond designed service life / V. L. Gorobets, O. M. Bondarev, V. M. Skoblenko // Наука та прогрес транспорту. 2014. № 6 (54). С. 119–127.

## **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ**

**Путято Артур Владимирович,**

д.т.н., доцент, ректор Гомельского государственного  
технического университета имени П.О. Сухого.

Пр. Октября 48, г. Гомель, 246746, Беларусь.

Тел.: +37 529 652 43 65.

E-mail: putsyata.artur@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1828-8052>.

*Інженери Демченко С. М., Татуревич А. А., Макаров Ю. О.*

## **ВПРОВАДЖЕННЯ НОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРУЖНИХ РЕЙКОВИХ СКРІПЛЕНЬ НА ЗАЛІЗНИЦЯХ УКРАЇНИ**

**Ключові слова:** залізниця, колія, скріплення, клема пружна, прокладка підрейкова, кутонаправляюча плита, боковий упор, шуруп колійний, дюбель пластмасовий.

### **Вступ**

Одним з відповідальних елементів верхньої будови колії є проміжне рейкове скріплення. Проміжні скріплення, виконуючи роль єднальних елементів між рейками і основою, повинні забезпечувати: стабільність ширини колії; притискання рейок до основи, що виключає угон рейок; оптимальні умови температурної роботи рейок; можливість виконання регулювання положення рейок за висотою та шириною колії; заміну деталей скріплень без перерви руху поїздів; надійну електроізоляцію рейок від основи; економічну ефективність конструкції верхньої будови колії [1].

Вимога щодо забезпечення стабільності ширини колії важлива, вона прямо пов'язана із забезпеченням безпеки руху поїздів [2]. Угон рейок призводить до зміни їх напружено-деформованого стану, що може викликати викид колії при підвищенні температури навколишнього середовища та розрив стиків у разі її зниження. Угон колії також призводить до зміщення та перекосу шпал, руйнуванню підрейкових прокладок. Ліквідація наслідків угону рейок пов'язана з виконанням складних і трудомістких робіт щодо регулювання зазорів між рейками і розрядці температурних напружень в рейкових плітях. Вимога щодо оптимізації температурної роботи рейок також пов'язана з величиною зусилля притиснення їх до основи. Недостатнє ж притискання рейок до основи викликає надмірні деформації кінцевих ділянок рейкових плітей, ускладнення конструкції стикових скріплень, швидкий знос проміжних скріплень, порушення рівнопружності основи внаслідок переміщення шпал.

Нині на залізницях України застосовуються рейкові проміжні скріплення на залізобетонних шпалах, такі як: КБ, КПП-1, КПП-5, КПП-5-К (для кривих ділянок колії). Відповідно до сучасних умов експлуатації для залізниць України потрібні й інші типи скріплень, які б забезпечували надійне прикріплення рейки до шпали з малою кількістю складових елементів, зручністю та надійністю монтажу (демонтажу), малим відсотком виходу з ладу його елементів протягом всього терміну експлуатації колії та невеликих експлуатаційних і матеріальних витратах на поточне утримання колії [3].

З 2019 року на залізницях України розпочато впровадження рейкових пружних скріплень типу Vossloh System W-30 компанії «Фосло Фастейнинг Системс ГмбХ» (Німеччина) та SBS W SL-1-900-R65 компанії «SCHWING AG» (Швейцарія), які добре зарекомендували себе на залізницях багатьох країн світу [4, 5]. Скріплення Vosslohi SBS надійні та легкі в обслуговуванні та забезпечують постійну підтримку заданих параметрів колії. Пружні клеми цих скріплень поєднують в собі необхідне утримуюче зусилля, поліпшену динамічну втомлену міцність і стійкий опір угону колії. Внаслідок своїх високих технічних характеристик пружні рейкові скріплення мають параметри, що забезпечують: надійну роботу колії при високих швидкостях руху пасажирських і вантажних поїздів; високий рівень поглинання шуму та вібрацій від руху поїздів; можливість регулювання рівня та ширини колії; зменшення експлуатаційних та матеріальних витрат на поточне утримання залізничної колії [6]. Усе це забезпечує безпечну роботу згаданих скріплень навіть в екстремальних умовах.

### **Завдання та мета дослідження**

Для порівняння технічних характеристик скріплень обох виробників в умовах експлуатації на залізницях України було прийняте рішення АТ «Укрзалізниця» щодо проведення відповідних експлуатаційних випробувань. Для цього у регіональній філії «Одеська залізниця» було вкладено дві ділянки колії з вантажонапруженістю більш ніж 50 млн ткм бруто/км на рік: одна з дослідними скріпленнями Vossloh System W-30, друга – з SBS W SL-1-900-R65. Метою проведення експлуатаційних випробувань обох типів скріплень було визначення відповідності параметрів скріплень реальним умовам експлуатації на головних коліях АТ «Укрзалізниця», оцінка працездатності скріплень на підставі спостережень та вимірювань в процесі експлуатації та отримання даних для прийняття рішення щодо можливості впровадження відповідних конструкцій рейкових скріплень в постійну експлуатацію на залізницях України.

### **Скріплення Vossloh System W30 компанії «Фосло Фастейнинг Системс ГмбХ»**

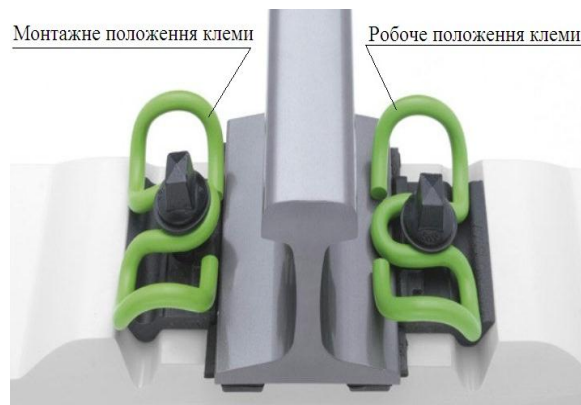
Проміжне пружне скріплення типу W30 (рис. 1) призначене для застосування в прямих і кривих ділянках колії з радіусом не менше 350 м.



*Рис. 1 – Скріплення типу W30*

Особливості цієї системи скріплень дозволяють використовувати їх в складних кліматичних умовах з великим перепадом температур навколишнього середовища та великою вантажонапруженістю залізничної лінії. Вузол скріплення системи Vossloh W30 має високу динамічну вібростійкість, забезпечує високий опір подовжньому зсуву рейок колії, а також має необхідну пружність.

Конструкція скріплення нероздільного типу W30 передбачає закріплення рейок від поперечного зсуву за допомогою двох бокових полімерних упорів, підрейкової прокладки, двох шурупів з прямокутною головкою та двох пружних клем Sk1 30, які при закручених шурупах забезпечують утримання рейки від повздовжнього зсуву та можуть встановлюватися у монтажне (транспортне) та робоче положення (рис. 2). Це дозволяє укласти або зняти рейки без розбирання скріплення.



*Рис. 2 – Монтажне та робоче положення клем Sk1 30 у скріпленні типу W30*



При використанні цього скріплення підшва рейки укладається на нашпальну прокладку між боковими упорами. Кріплення рейки виконується за допомогою пружних клем і шурупів, які закручуються в спеціальні пластмасові дюбелі, що забетоновані в залізобетонну шпалу. Кінці клеми притискають підшву рейки, а центральна петля клеми спирається на боковий упор. Боковий упор сприймає бокові навантаження від підшви рейки та передає їх на шпалу, виключаючи передачу бокової сили на стрижень шурупу. Плечі клеми (з пружним ходом 14 мм) стабільно притискають підшву рейки до шпали через прокладку, забезпечуючи необхідний опір подовжньому переміщенню рейкових плітей.

Електроізоляція однієї рейкової нитки від іншої здійснюється за рахунок застосування ізолюючих елементів – дюбеля, забетонованого в залізобетонну шпалу, бокового упору та прокладки. Скріплення типу W30 застосовується з залізобетонними попередньо напруженими шпалами типу Ш-9.1, які виготовляються в Україні.

### **Експлуатаційні випробування скріплення VOSSLOH SYSTEM W-30**

Дослідна партія скріплення VOSSLOH SYSTEM W-30 з залізобетонними шпалами типу Ш-9.1 була введена у грудні 2019 року на ділянці колії Пантаївка – Користівка регіональної філії «Одеська залізниця» АТ «Укрзалізниця» (рис. 3). Довжина ділянки складає 800 м і вона має наступні характеристики:

- конструкція колії безстикова, зі скріпленнями Vossloh System W-30;
- вантажна напруженість ділянки складає 83,3 млн т км бруто/км за рік;
- рейки типу Р65, шпали залізобетонні типу Ш-9.1, баласт щебеневий;
- розташування в прямій (137 м) та кривій радіуса 634 м (663 м).



*Рис. 3 – Установка скріплення VOSSLOH SYSTEM W-30 в колії*

Експлуатаційні випробування виконувалось відповідно до затвердженої Програми та методики експлуатаційних випробувань дослідної партії скріплень Vossloh System W-30 ПМ1 «Скріплення проміжне пружне рейкове Vossloh System W-30» [7]. За передбачений умовами випробувань період експлуатації зауваження щодо роботи елементів скріплення та скріплення в цілому відсутні. Дефекти скріплення також були відсутні. Крутний момент затягування шурупа кріплення скріплення до шпали не змінювався і був відповідним нормативному значенню 300-350 Н·м.

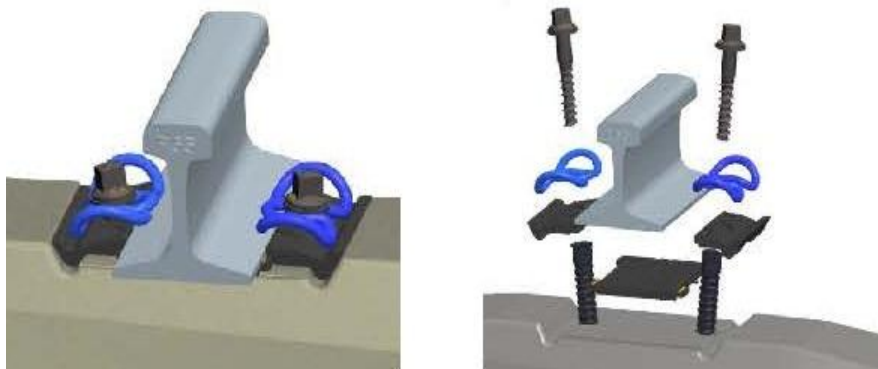
У червні 2021 року були виконані офіційні приймальні випробування скріплення проміжного пружного рейкового Vossloh System W-30 із залізобетонними шпалами типу Ш-9.1. За результатами випробувань встановлено:

1. Експлуатаційні випробування скріплення проміжного пружного рейкового Vossloh System W-30 із залізобетонними шпалами типу Ш-9.1 виконані у повному обсязі.
2. Параметри скріплення проміжного пружного рейкового Vossloh System W-30 відповідають реальним умовам експлуатації на головних коліях АТ «Укрзалізниця».

3. Скріплення проміжне пружне рейкове Vossloh System W-30, компанії «Фосло Фастейнинг Системс ГмбХ», вважати таким, що витримало приймальні випробування в умовах експлуатації на залізниці АТ «Укрзалізниця».

#### **Скріплення типу SBS W SL-1-900-R65 компанії «SCHWING AG»**

Скріплення проміжне пружне шурупно-дюбельне типу SBS W SL-1-900-R65 компанії «SCHWING AG» (рис. 4) призначене для укладання в прямих та кривих ділянках безстикової залізничної колії. Скріплення укладається на залізобетонні шпали типу SH, з шириною підрейкової площадки 185 мм, та типу SH.1, з шириною підрейкової площадки 170 мм (виготовляються в Україні). Склад вузла скріплення типу SBS W SL-1-900-R65 наведено в таблиці 1.



*Рис.4 – Скріплення типу SBS W SL-1-900-R65*

*Табл. 1 – Склад вузла скріплення SBS W SL-1-900-R65*

Назва деталей вузла скріплення	Кількість на один вузол, шт.	Кількість на одну шпалу, шт.
Клема пружна SklSL-1	2	4
Шуруп колійний Ss 25	2	4
Плита кутонаправляюча WfpSL-2	2	4
Дюбель пластмасовий SduS3	2	4
Прокладка підрейкова ZwSL-900	1	2

#### **Експлуатаційні випробування скріплення SBS W SL-1-900-R65**

Скріплення типу SBS W SL-1-900-R65 фірми «SCHWING AG» вкладені на ділянці залізничної колії Пантаївка – Користівка регіональної філії «Одеська залізниця» АТ «Укрзалізниця» (рис. 5) з наступними характеристиками:

- конструкція колії безстикова, зі скріпленнями SBS W SL-1-900-R65;
- вантажонапруженість ділянки 83,3 млн. т км бруто/км за рік;
- рейки типу Р65, шпали залізобетонні типу SH та SH.1, баласт щебеневий;
- розташування в кривій радіуса 542 м (1120 м).



*Рис.5 – Установка скріплення SBS W SL-1-900-R65 в колії*

Для визначення оптимального типу підрейкової прокладки, з різними показниками жорсткості та розмірів, на дослідній ділянці було вкрито прокладки з жорсткістю 60 кН/мм, шириною 180 мм, прокладки з жорсткістю 60 кН/мм, шириною 167 мм, та прокладки з жорсткістю 150 кН/мм, шириною 180 мм. Вкладання ділянки колії було виконано в травні 2020 року. За період дослідної експлуатації зауваження до роботи елементів скріплення та скріплення в цілому були відсутні. Дефектів скріплення не виявлено. Крутний момент затягування шурупів відповідав нормативному значенню 300-350 Н·м.

У липні 2021 року було здійснено приймальні випробування скріплення проміжного пружного типу SBS W SL-1-900-R65, фірми «SCHWING AG», відповідно до Програми та методики експлуатаційних випробувань дослідної партії GSI 003 ПМ [8].

За результатами експлуатаційних випробувань було встановлено:

1. Експлуатаційні випробування скріплення проміжного пружного рейкового типу SBS W SL-1-900-R65, фірми «SCHWING AG», виконані у повному обсязі.
2. Параметри скріплення проміжного пружного рейкового типу SBS W SL-1-900-R65 відповідають реальним умовам експлуатації на головних коліях АТ «Укрзалізниця».
3. Скріплення проміжне пружне рейкове типу SBS W SL-1-900-R65 фірми «SCHWING AG» вважати таким, що витримало приймальні випробування в умовах експлуатації на залізниці АТ «Укрзалізниця».

#### **Висновки**

Скріплення типу SBS W SL-1-900-R65, фірми «SCHWING AG», та Vossloh System W-30, компанії «Фосло Фастейнинг Системс ГмбХ», мають схожість за своєю конструкцією та відповідають умовам експлуатації на залізницях України, що також підтверджується багаторічним досвідом успішної їх експлуатації на залізницях багатьох країн світу.

#### **Література**

1. Лысюк В.С. Надежность железнодорожного пути / В.С. Лысюк, В.Б. Каменский, Л.В. Башкатова; под. ред. В.С. Лысюка. – Москва: Транспорт, 2001. – 286 с.
2. Технические требования к рельсовым скреплениям для высокоскоростного движения : Памятка ОСЖД О+Р-749. – [Дата введения 24-04-2009]. – Варшава: Комитет ОСЖД, 2013. – 3 с. – (Нормативный документ ОСЖД).
3. Даниленко Э.И. Обеспечение надёжности и прочности упругих скреплений для повышения безопасности движения поездов / Э.И. Даниленко, М.Д. Костюк // Вестник БелГУТ. – 2002. – № 2(5). – С. 21-25.

4. Альбрехт В.Г. Современные конструкции верхнего строения железнодорожного пути / В.Г. Альбрехт, А.Ф. Золотарский. – Москва : Транспорт, 1975. – 280 с.
5. Шекербеков У.Т. Опыт применения рельсового скрепления Vossloh (Германия) / У.Т. Шекербеков, Н.А. Осмонканов // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. – 2013. – № 4. – С. 196-201.
6. Кузнецова Н.В. Особенности влияния промежуточных рельсовых скреплений на эксплуатационную стойкость рельсов / Н.В. Кузнецова, Е.А. Сидорова // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2021. – Т. 80, № 4. – С. 201-208.
7. Скріплення проміжне пружне рейкове Vossloh System W-30. Програма та методика експлуатаційних випробувань дослідної партії : Vossloh System W-30 ПМ1. – Київ, Філія «НДКТІ» УЗ, 2019. – 21 с. – (Нормативний документ АТ «Укрзалізниця»).
8. Скріплення проміжне пружне типу SBS W SL-1-900-R65. Програма та методика експлуатаційних випробувань дослідної партії: GSI 003 ПМ. – Київ, Філія «НДКТІ» УЗ, 2020. – 24 с. – (Нормативний документ АТ «Укрзалізниця»).

#### **ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ**

**Демченко Сергій Миколайович,**

начальник структурного підрозділу «Дніпровське науково-конструкторське технологічне бюро колійного господарства» філії «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут залізничного транспорту» («НДКТІ») АТ «Укрзалізниця».

Вул. Вокзальна, 11-ж, м. Дніпро,  
49038, Україна.

Тел.: +38 056 793 23 60.

E-mail: s.demchenko@dp.uz.gov.ua.

**Татуревич Аркадій Анатолійович,**

провідний інженер відділу стандартизації, науково-технічної інформації та нормоконтролю філії «НДКТІ» АТ «Укрзалізниця».

Вул. Вокзальна, 11-ж, м. Дніпро,  
49038, Україна.

Тел.: +38 056 793 23 46.

E-mail: a.taturevich@dp.uz.gov.ua.

**Макаров Юрій Олександрович,**

начальник виробничого підрозділу «Колісобстежувальна станція ПС-1» філії «Центр діагностики залізничної інфраструктури» АТ «Укрзалізниця».

Вул. Привокзальна, 9-б, м. Дніпро,  
49038, Україна.

Тел.: +38 056 793 18 23.

E-mail: Yu.Makarov@dp.uz.gov.ua.



*Д-р техн. наук Варбанець Р. А.  
Кандидати техн. наук Мальчевський В. П.,  
Кучеренко Ю. М., Мінчев Д. С., Кирнац В. І.  
Аспирант Бондаренко В. І.*

## **ДІАГНОСТИКА РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ДВОТАКТНИХ ДВИГУНІВ MAN B&W**

**Ключові слова:** дизелі, робочий процес, моделювання, діагностика, паливна апаратура, клапани газорозподілу.

### **Вступ**

Використання двигунів із двотактним принципом дії на тепловозах в АТ «Укрзалізниця» стимулює розвиток сучасних методів контролю їхнього робочого процесу. Насамперед йдеться про неруйнівні методи контролю в умовах скороченого часу під час реостатних випробовувань двигунів.

Використання досвіду діагностики робочого процесу морських та стаціонарних двотактних двигунів, широко поширених на морському флоті, безсумнівно буде корисно і може бути з успіхом застосовано для тепловозних двигунів, оскільки багато завдань і проблем експлуатації двигунів на транспортних засобах є спільними для морських і тепловозних двигунів. Насамперед це робота на нестаціонарних режимах, для яких актуальне застосування аналітичних методів синхронізації даних в альтернативу апаратним методам, а також методів вібродіагностики.

Зміна температури палива також впливає на робочий процес. Ряд параметрів робочого процесу таких, як якість сумішеутворення, затримка самозаймання та характеристики згоряння в циліндрах, залежать від стабільної роботи системи паливopідготовки та насамперед від роботи системи стабілізації температури на вході в паливні насоси високого тиску.

**Метою дослідження** є аналіз технічного стану та виявлення дефектів основних вузлів та агрегатів двотактних дизелів за допомогою методів комплексної параметричної діагностики робочого процесу двигуна. Застосування сучасних методів синхронізації даних та вібродіагностики розширює можливості діагностики двигунів. Використовуючи існуючі методи, неможливо здійснювати під час експлуатації прямі вимірювання тиску впорскування палива, фаз подачі та газорозподілу двигунів за допомогою переносних діагностичних систем. Альтернативою прямим вимірюванням є аналіз вібродіаграм за допомогою якого можна визначити фази підйому та посадки голки форсунки, початку подачі та відсікання палива паливним насосом високого тиску, початок та кінець циркуляції підігрітого важкого палива в паливній системі, а також фази закриття та, у деяких випадках, відкриття клапанів газорозподілу і клапанів установки контролю температури палива.

### **Параметрична діагностика робочого процесу двотактних дизелів**

Специфіка експлуатації морських двигунів полягає в тому, що від їхньої безперервної безаварійної роботи залежить життя судна та екіпажу. В даному випадку, надійна робота двохтактних двигунів електростанції Mahon, що знаходиться на острові Менорка (Іспанія), забезпечує екологічну безпеку життя жителів іспанських островів в умовах їх автономного існування [1]. Безаварійну роботу двигунів можна забезпечити за допомогою регулярного контролю параметрів робочого процесу в їх циліндрах. Регулярний періодичний аналіз параметрів робочого процесу в циліндрах дає можливість оптимізувати роботу двигунів, рівномірно розподіляти навантаження між циліндрами та вчасно виявляти небезпечні тенденції у зміні технічного стану основних систем та вузлів двигуна [2 – 8].

Деякі параметри робочого процесу, такі як якість сумішеутворення, затримка самозаймання та характеристика згоряння в циліндрах дизеля залежить від температури палива перед паливним насосом високого тиску (ПНВТ), яка регулюється певною системою контролю. Вчасне виявлення

дефектів окремих вузлів системи контролю температури палива, таких як компресори холодильних установок, дозволить уникнути багатьох аварійних ситуацій, пов'язаних із наслідками раптового збільшення або зменшення температур палива перед ПНВТ.

Періодичний контроль дозволяє виявляти дефекти, що зароджуються під час експлуатації. Прикладами таких дефектів є зниження середнього індикаторного тиску  $MIP$  або тиску кінця стиснення  $P_{comp}$ , що відразу буде виявлено шляхом аналізу індикаторних діаграм  $P(CA, deg)$ . Однак існує ряд дефектів, виявити які за допомогою лише аналізу індикаторних діаграм досить складно. Йдеться про дефекти паливної апаратури високого тиску та дефекти механізму управління клапанами газорозподілу.

Саме ці дефекти найчастіше виникають у процесі експлуатації морських двигунів. Особливо це стосується дефектів паливної апаратури високого тиску. Безпосередні вимірювання та аналіз діаграм тиску упорскування палива перед форсунками могли б дати повну діагностичну інформацію про технічний стан паливної системи високого тиску, проте такі вимірювання неможливо проводити на морських двигунах за допомогою переносних пристроїв в умовах експлуатації, у зв'язку з сучасними вимогами ІМО та вимогами більшості сертифікаційних морських товариств [9]. Альтернативою прямим вимірам є застосування вібродатчика на магнітній платформі кріплення [5 – 8].

Деякі дефекти можуть бути виявлені шляхом аналізу індикаторних діаграм і їх форми на ділянках стиснення та згоряння, а також шляхом аналізу основних параметрів робочого процесу (табл. 1) [2]. Однак, існує також думка, що аналіз одних тільки індикаторних діаграм  $P(CA, deg)$  не достатній для точної діагностики двигуна внутрішнього згорання [4 – 8]. Багато ознак дефектів, які виявляються на індикаторних діаграмах, можуть бути викликані різними причинами. Наприклад, пізнє згоряння палива в циліндрі, виявлене шляхом аналізу фаз початку згоряння (ignitionpoints), може бути наслідком як пізнього кута впорскування палива, так і зношування прецизійних вузлів паливної апаратури високого тиску і зниження тиску палива перед форсунками при упорскуванні.

Табл.1– Параметри робочого процесу дизеля, що визначаються в експлуатації

$P_{max} (P_z)$	Maximum combustion pressure and corresponding crank angle, Bar / °CA
$P_{comp}$	Maximum compression pressure, Bar
$IMEP (MIP)$	Mean Indicated Pressure, Bar
$IPOWER$	Indicated Cylinder Power, kW
$P_{ignition}$	Combustion start pressure and corresponding crank angle, Bar / °CA
$P_{exp} (P_{36})$	Pressure at 36 °CA after TDC
<i>Fuel Injection Timing</i>	Real and Geometrical phases of fuel injection, °CA
<i>Valves Timing</i>	Intake and Exhaust valves timing phases, °CA
<i>Fuel Ignition Delay</i>	Period from the Start of Injection to the Start of Combustion, °CA (ms)
$\Delta G$	Difference between Real and Geometrical phases of fuel injection, °CA

При аналізі одного з найбільш характерних дефектів циліндро-поршневої групи дизеля - зниження компресії в робочому циліндрі, теж існує неоднозначність при аналізі одних тільки індикаторних діаграм. Зниження компресії може бути викликане наступними причинами: зносом втулки циліндра, зносом та/або залипанням поршневих кілець, нещільністю закриття клапанів або порушенням фаз газорозподілу. Всі ці причини спричиняють один наслідок – зниження параметра  $P_{comp}$  і за ним  $P_{max}$  і  $MIP$ . Таким чином, справжня причина дефекту може бути нез'ясованою.

Основними показниками роботи циліндрів двигуна, що визначаються за допомогою аналізу індикаторних діаграм, є середній індикаторний тиск та індикаторна потужність циліндрів. Проте точна причина зниження чи збільшення цих показників може бути нез'ясованою без аналізу додаткової інформації. Одним із способів отримання додаткової інформації є використання математичного моделювання робочого процесу двигуна [10 – 12], що дозволяє у ряді випадків уточнити причини тих чи інших відхилень або дефектів. Тим не менш, можливість вимірювань параметрів, що необхідні для аналізу, під час експлуатації є переважною.

За допомогою математичного моделювання ми розглянули наслідки можливих несправностей суднових дизельних двигунів. Математичне моделювання дає можливість уточнити вплив заданих параметрів на загальні характеристики робочого процесу двигуна. В перш чергу на його потужність, економічність та екологічність. Математичне моделювання також надає прогнози, які корисні для вчасного виявлення різних несправностей двигуна на практиці.

Створена математична модель базується на квазістаціонарних та одновимірних нестационарних системах рівнянь, які описують процеси у відкритих термодинамічних системах, що є складовими загальної термодинамічної системи – двигуна.

Набори квазістаціонарних рівнянь включають перший закон термодинаміки, баланс мас і диференціальні рівняння стану газу у циліндрі двигуна. Його можна виразити для однозонних і двозонних відкритих термодинамічних систем в наступному вигляді:

$$\left( \frac{dI_{fuel}}{d\phi} + \sum_1^{n_1} \frac{dI_j}{d\phi} \right) + \frac{\delta Q_{comb}}{d\phi} + \sum_1^{n_2} \frac{\delta Q_{wall,i}}{d\phi} = c_{vm} T \left( \sum_1^{n_1} \frac{dm_j}{d\phi} + \frac{dm_{fuel}}{d\phi} \right) + c_v m \frac{dT}{d\phi} + m T \frac{d(c_v)_T}{d\phi} + p \frac{dV}{d\phi}, \quad (1)$$

де:  $dI_{fuel}/d\phi$ ,  $dI_j/d\phi$  – швидкість зміни ентальпії внаслідок масообмінних процесів;  
 $\delta Q_{comb}/d\phi$  – швидкість виділення тепла внаслідок згоряння палива;  
 $\delta Q_{wall,i}/d\phi$  – швидкість теплопередачі до стінок системи;  
 $dm_{fuel}/d\phi$ ,  $dm_j/d\phi$  – масова витрата палива і масова витрата газів;  
 $n_1$  – кількість взаємодіючих термодинамічних систем, що беруть участь у процесі масообміну;  
 $n_2$  – кількість стінок, що беруть участь у процесі теплообміну;  
 $p$ ,  $T$ ,  $V$ ,  $m$  – тиск, температура, об'єм та маса газу у відкритій термодинамічній системі;  
 $c_v$ ,  $c_{vm}$  – фактична та середня ізохорні питомі теплоємності.

Математична модель на базі рівняння (1) є основою онлайн-ресурсу Blitz-PRO [10], який дає можливість моделювати процеси роботи двигунів внутрішнього згоряння. Цей сервіс має вільний доступ та надає можливість моделювання як стаціонарного, так і нестационарного режимів роботи двигуна. За допомогою цього ресурсу був промодельований робочий процес двотактного дизельного двигуна MAN B&W та визначені основні властивості його робочого процесу (рис.1).

Під час діагностування двигунів на електростанції Mahon був застосований алгоритмічний метод розрахунку та корекції ВМТ поршня у циліндрі [13], тому що часу на підготовку до діагностування двигунів не було і вони, як завжди, знаходилися в стані роботи під навантаженням. Було записано кілька режимів навантаження, та були розраховані індикаторні діаграми з вібродіаграмами форсунки, клапана та паливного насосу високого тиску двигуна MAN B&W10L67GBES. На рисунку 2 наведено діаграми для першого циліндру двигуна під навантаженням 75 % від номінальної потужності. На цьому рисунку об'єднано (зверху вниз): індикаторну діаграму тиску газів в циліндрі, вібродіаграми торцю форсунки, кришки циліндра та відсічки паливного насосу високого тиску. Згідно юридичним вимогам Іспанії відносно викидів CO<sub>2</sub> [1], а також вимогам ІМО відносно викидів NO<sub>x</sub> [9], робочий процес двигуна перебудовано на пізню паливотподачу. Завдяки цьому знижені параметри  $P_{max}T_{max}$ , що значно знижують рівень NO<sub>x</sub> в відпрацьованих газах - мінімум на 3 % нижче вимог ІМО.

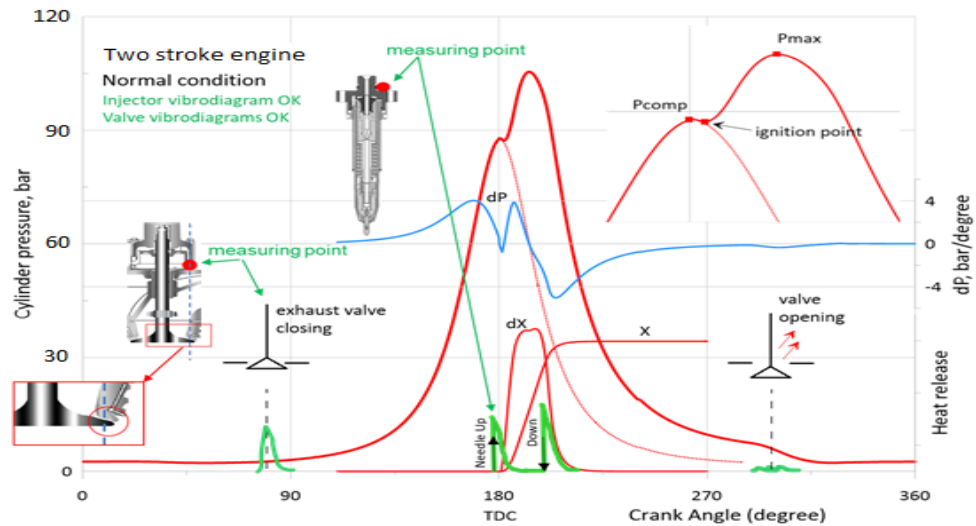


Рис. 1 – Модель робочого процесу та вібродіаграм форсунки і клапана двотактного двигуна

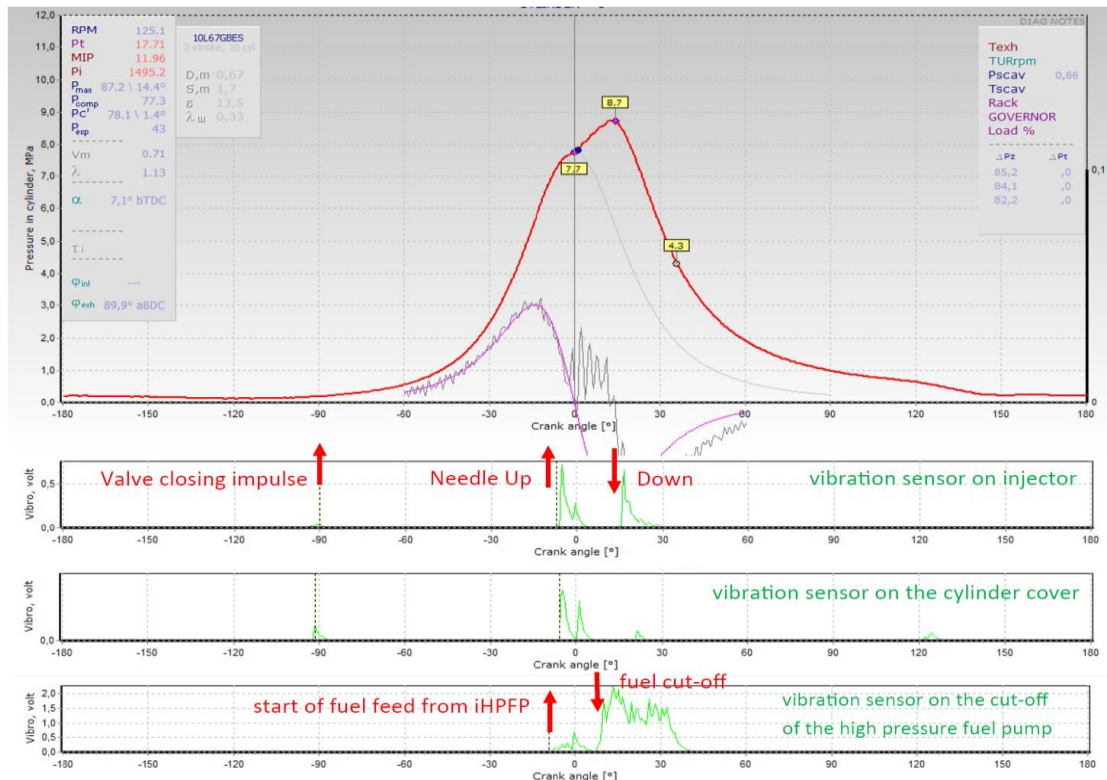


Рис.2 – Результати вимірювання показників робочого процесу та вібродіаграм форсунки, клапана і паливного насосу високого тиску на двотактному двигуні MAN B&W10L67GBES

Проведений аналіз індикаторних діаграм та вібродіаграм робочих циліндрів дав можливість розрахувати індикаторну потужність двигуна внутрішнього згорання та виконати ретельний аналіз його технічного стану.

### Висновки

Досвід авторів у діагностуванні морських та тепловозних двигунів показав, що аналіз вібродіаграм паливної апаратури, механізму газорозподілу двигуна, впускних та випускних клапанів, компресору холодильної установки, системи стабілізації температури палива, записаних паралельно з індикаторними діаграмами, дає хороші діагностичні результати. За допомогою встановлення вібродатчика на магнітній платформі можна визначити:

- фази підйому та посадки голки форсунки;



- початок та кінець циркуляції підігрітого важкого палива у паливній системі;
- фази початку подачі та відсічення палива паливним насосом високого тиску;
- фази закриття та, у деяких випадках, відкриття клапанів газорозподілу;
- частоти та амплітуди коливань при роботі впускних та випускних клапанів компресора холодильної установки.

Можлива також непряма оцінка гідроцильності паливної апаратури та тиску впорскування палива. Більше того, така цінна інформація для інженерів, як дійсні фази газорозподілу поршневих компресорів та двигунів, раніше була недоступна для діагностування під час роботи двигуна і визначалася тільки на зупиненому двигуні, шляхом низки тривалих маніпуляцій. Крім того, точність визначення фаз газорозподілу залежала від кваліфікації інженера і часто мала суб'єктивний характер.

Під час експлуатації така інформація може бути отримана безпосередньо за допомогою аналізу вібродіаграм. Розглянутий спосіб отримання інформації доступний та зручний у процесі експлуатації двигуна або компресора холодильної установки. Поряд з алгоритмічним методом розрахунку та корекції положення ВМТ поршня у циліндрі, який застосовується в переносних діагностичних системах, аналіз вібродіаграм паралельно з індикаторними діаграмами  $P(CA, deg)$  дозволяє отримати таку інформацію, яка раніше була доступна тільки в лабораторних умовах.

Аналіз індикаторних потужностей циліндрів та параметрів робочих процесів дозволив інженерам електростанції Mahon (Іспанія) провести налаштування фаз паливоподачі та газорозподілу двигуна таким чином, щоб досягти максимальної його індикаторної потужності та економічності робочого процесу, не перевищуючи допустимий рівень NOx у відпрацьованих газах.

### **Література**

1. Mahon central power station and health. – Available from: <https://english.gobmenorca.com/mahon-central-power-station-and-health/>.
2. Heywood J. Internal combustion engine fundamentals. New York: McGraw-Hill, 1988.
3. Neumann S. High temperature pressure sensor based on thin film strain gauges on stainless steel for continuous cylinder pressure control [Текст] / S. Neumann // CIMAC Congress. Digest. – Hamburg, 2001. – pp. 1–12.
4. Neumann S. Marine diesels working cycle monitoring on the base of IMES GmbH pressure sensors data [Текст] / S. Neumann, R. Varbanets, O. Kyrylash, O. Yeryganov, V. Maulevych // Diagnostyka, 2019. – Vol. 20, No. 2, p.p. 19–26. - Available from <https://doi:10.29354/diag/104516>.
5. Varbanets R. Diagnostic control of the working process of marine diesel engines in operation: dissertation of the Doctor of Technical Sciences: specialty 05.05.03 / Varbanets Roman Anatoljevich. – Odessa, 2010.
6. Varbanets R. Acoustic Method for Estimation of Marine Low-Speed Engine Turbocharger Parameters [Internet] / R. Varbanets, O. Fomin, V. Pištěk, V. Klymenko, D. Minchev, A. Khrulev et al. // Journal of Marine Science and Engineering, 2021. – Vol. 9(3), No. 321, p. 1-12. - Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/jmse9030321>.
7. Varbanets R. Analyze of marine diesel engine performance [Text] / R. Varbanets, A. Karianskiy // Journal of Polish CIMAC. Energetic Aspects, Gdansk, Faculty of Ocean Engineering and Ship Technology Gdansk University of Technology, 2012. – Vol. 7, No. 1, pp. 269-275.
8. Varbanets R. Improvement of diagnosing methods of the diesel engine functioning under operating conditions [Text] / R. Varbanets, S. Karianskiy, S. Rudenko at al. // SAE Technical Paper 2017-01-2218, 2017.
9. IMO (2020), International Convention for the Safety of Life At Sea, part B. Prevention of fire and explosion, paragraph 2.2.5.2. SOLAS Consolidated Edition 2020. London: International Maritime Organization.
10. Minchev D. Marine Diesel Engines Operating Cycle Simulation for Diagnostics Issues [Text] / D. Minchev, R. Varbanets, N. Aleksandrovskaia and L. Pisintsaly // ActaPolytechnica, 2021, Vol. 3, No. 61, p.p. 428–440. - Available from: <http://dx.doi.org/10.14311/AP.2021.61.0435>.

11. Blitz-PRO by D.S. Minchev. User's manual. – Available from: <http://blitzpro.zeddmalam.com/extra/Tutorial/Help.pdf>.
12. Minchev D. Centrifugal compressor performance maps treatment for internal combustion engines operating cycle simulation [Text] / D. Minchev, R. Varbanets // Internal combustion engines, 2021, No. 1, p.p. 9-15. Doi: 10.20998/0419-8719.2021.1.02.
13. Varbanets R. Determination of top dead centre location based on the marine diesel engine indicator diagram analysis [Text] / R. Varbanets, V. Zalozh, A. Shakhov, I. Savelieva and V. Piterska // Diagnostyka, 2020, Vol. 21, No. 1, pp.51-60. – Available from <https://doi.org/10.29354/diag/116585>.

## **ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ**

### **Варбанець Роман Анатолійович,**

д.т.н., професор, завідувач кафедри суднових енергетичних установок і технічної експлуатації (СЕУ і ТЕ), науковий керівник лабораторії "Моніторинг СДВС" Одеського національного морського університету (ОНМУ), консультант з математики IMES GmbH.  
Вул. Мечникова, 34, м. Одеса, 65029, Україна.  
Тел.: +38 050 658 54 93.  
E-mail: [roman.varbanets@gmail.com](mailto:roman.varbanets@gmail.com).  
<http://orcid.org/0000-0001-6730-0380>.

### **Мальчевський Валентин Павлович,**

к.т.н., доцент, доцент кафедри СЕУ та ТЕ ОНМУ.  
Вул. Мечникова, 34, м. Одеса, 65029, Україна.  
Тел.: +38 050 924 87 61.  
E-mail: [valentinmalchevsky@gmail.com](mailto:valentinmalchevsky@gmail.com).  
<https://orcid.org/0000-0003-3117-1251>.

### **Кучеренко Юрій Миколайович,**

к.т.н., доцент, доцент кафедри СЕУ та ТЕ ОНМУ.  
Вул. Мечникова, 34, м. Одеса, 65029, Україна.  
Тел.: +38 0482 728 31 19.  
E-mail: [kucherenko.iurii@gmail.com](mailto:kucherenko.iurii@gmail.com).

### **Мінчев Дмитро Степанович,**

к.т.н., доцент, доцент кафедри СЕУ та ТЕ ОНМУ.  
Вул. Мечникова, 34, м. Одеса, 65029, Україна.  
Тел.: +38 0482 728 31 19.  
E-mail: [misaidima@gmail.com](mailto:misaidima@gmail.com).  
<http://orcid.org/0000-0002-5960-3063>.

### **Кирнац Владислав Іванович,**

к.т.н., доцент, доцент кафедри СЕУ та ТЕ ОНМУ.  
Вул. Мечникова, 34, м. Одеса, 65029, Україна.  
Тел.: +38 0482 728 31 19.  
E-mail: [kirnacsvlad@gmail.com](mailto:kirnacsvlad@gmail.com).

### **Бондаренко Вячеслав Володимирович,**

аспірант кафедри СЕУ та ТЕ ОНМУ.  
Вул. Мечникова, 34, м. Одеса, 65029, Україна.  
Тел.: +38 0482 728 31 19.  
E-mail: [kirnacsvlad@gmail.com](mailto:kirnacsvlad@gmail.com).

*Д-р техн. наук Капіца М. І.  
Канд. техн. наук Бобирь Д. В.  
Канд. техн. наук Кислий Д. М.  
Аспірант Богомолов А. Р.*

## **РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОННОЇ ЧАСТИНИ КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЦИЛІНДРОПОРШНЕВОЇ ГРУПИ ДИЗЕЛЯ**

**Ключові слова:** дизель, циліндропоршнева група, витрата повітря, датчик витрати повітря, термоанемометр, нерозбірне діагностування, тяговий рухомий склад, силова енергетична установка, технічне обслуговування.

### **Вступ**

Для забезпечення перевізного процесу справними локомотивами на залізницях України застосовується планово-попереджувальна система їх технічного обслуговування (ТО) та ремонту. Вона забезпечує підтримання технічного стану тягового рухомого складу у експлуатації на необхідному рівні надійності та безпеки руху [1].

З урахуванням фактичного технічного стану, а також постійного зростання витрат на утримання тягового рухомого складу з понаднормованим строком служби, який експлуатується залізницями України, планово-попереджувальна система ремонтів не завжди відповідає вимогам забезпечення перевізного процесу та необхідного рівня безпеки руху. Непоодинокі випадки, коли відповідно до встановленої періодичності ремонту або обслуговування доводиться втручатися в роботу нормально налагодженого механізму, розбирати, замінювати деталі, збирати і регулювати, хоча його технічний стан такого втручання не потребує. Надійність роботи такого вузла не підвищується, проте збільшуються витрати на виконання ремонту. Враховуючи вище сказане та загальну тенденцію переходу до виконання технічного обслуговування та ремонтів відповідно до фактичного технічного стану складальних одиниць тягового рухомого складу доцільно застосовувати систему їх утримування за фактичним станом або комбіновану.

Виконання ТО та ремонтів залізничного тягового рухомого складу за його фактичним технічним станом буде можливим лише з застосуванням автоматизованих систем нерозбірного діагностування та контролю технічного стану вузлів і деталей технічного об'єкту, пошуку несправностей та визначення їх причин, прогнозування залишкового ресурсу механізмів і визначення термінів профілактичного ремонту, без зайвого розбирання [2].

Тепловозна силова енергетична установка є одним з найголовніших об'єктів для діагностування у локомотиві [3]. Одним з основних її елементів є двигун внутрішнього згоряння. За співвідношенням кількості відмов двигунів внутрішнього згоряння його циліндропоршнева група (ЦПГ) посідає друге місце (до 20%) після паливної апаратури (до 45%) [4]. Циліндропоршнева група двигуна працює у найбільш важких умовах, таких як висока температура та великі циклічні і динамічні навантаження. При цьому відбувається інтенсивне зношування поршневих кілець і поверхонь тіла циліндра. Внаслідок їх зношування зменшується компресія в циліндрах, двигун втрачає потужність, ускладнюється запуск двигуна, збільшується витрата масла та палива, погіршуються екологічні показники. Отже, герметичність камер згоряння циліндрів є одним із найважливіших ресурсних параметрів технічного стану двигуна.

Серед показників, за якими можна визначити технічний стан циліндропоршневої групи з застосуванням автоматизованих систем нерозбірного діагностування технічного стану, є втрата повітря під час його стиснення у циліндрах двигуна. Для визначення відповідного діагностичного параметру необхідно мати спеціалізований апаратний комплекс, який може базуватися на термоанемометричних датчиках.

### **Мета дослідження**

Метою та завданням дослідження є розробка частини спеціалізованого апаратно-програмного комплексу для визначення технічного стану циліндропоршневої групи тепловозного дизеля, що забезпечить зменшення витрат матеріальних ресурсів та часу на виконання операцій з її технічного діагностування, скоротить час простою тепловозів на позапланових видах ремонтів та забезпечить відповідний рівень безпеки руху рухомого складу [5].

### **Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми**

Тепловозна силова енергетична установка є складною системою, від її технічного стану безпосередньо залежить працездатність тепловоза, що у свою чергу впливає на виконання плану пасажирських та вантажних перевезень залізницями і безпеку руху. У зв'язку з цим діагностування тепловозної силової енергетичної установки є одним з найважливіших завдань при визначенні технічного стану тягового рухомого складу [6]. Для зменшення витрат часу та коштів на визначення технічного стану силової енергетичної установки необхідно обрати метод, який буде забезпечувати суттєве скорочення витрат енергоресурсів під час діагностування й дасть можливість найбільш точно визначити технічний стан ЦПП.

Існують різні способи та методи діагностування дизелів, серед яких є спосіб, в якому визначальним діагностичним параметром є витрата двигуном повітря для своєї роботи [7, 8]. Для вимірювання витрати повітря використовують датчики витрати повітря різних конструкцій, але кожен з них можна віднести до одного з двох типів – датчики вимірювання об'ємної витрати повітря та датчики масової витрати повітря. Переважно використовують датчики масової витрати повітря (ДМВП), тому що вони вимірюють безпосередньо масу повітря за одиницю часу (ДМВП враховує температуру, тиск атмосферного повітря, його вологість). Крім того, конструкція ДМВП не має рухомих механічних частин. Але через складність їх конструкції, в ранніх системах діагностування застосовувалися в основному датчики об'ємної витрати повітря (ДОВП). Вони використовуються рідше, оскільки вимірюють тільки обсяг споживаного повітря. Але маса повітря (як і будь-яких інших газів), суттєво залежить від його тиску, температури й вологості.

Датчик масової витрати повітря – це датчик, який використовується для визначення масової витрати повітря, яке надходить у двигуні внутрішнього згоряння та перетворює отриману масову витрату повітря в цифровий або аналоговий сигнал. Він використовується для коригування кількості повітря, що надходить в циліндри двигуна. Датчик масової витрати повітря може застосовуватися спільно з датчиками температури повітря та атмосферного тиску, які додатково коригують його показання.

Розрізняють два основних типи ДМВП: проволочний та плівковий. Як правило, в якості датчиків масової витрати повітря застосовуються термоанемометри опору, в яких у перерізі потоку повітря розміщується чутливий елемент, який виконує функції термоопору. Датчик складається з двох платинових дрітів, які нагріваються електричним струмом. Через один дріт, охолоджуючи його, проходить потік повітря, а другий є контрольним. За зміною струму, який проходить через платиновий дріт, що охолоджується повітряним потоком, обчислюється кількість повітря що проходить через датчик (у відповідності зі зміною опору провідника, відповідно до закону Ома).

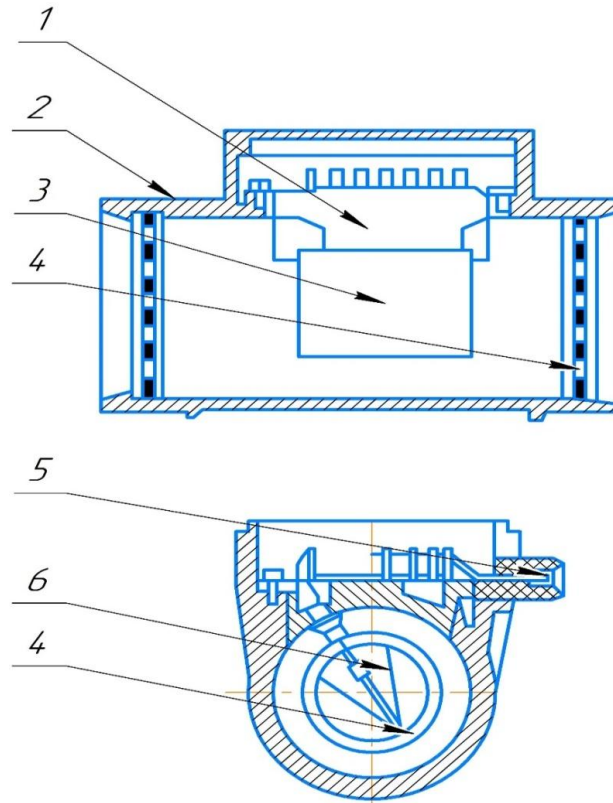
Конструктивну схему побудови термоанемометричного датчика наведено на рисунку 1. В корпусі датчика 2 знаходиться трубка 3, в якій встановлено платиновий дріт 6. Він підігрівається до температури 300–600°C. Чим більше швидкість руху повітря, що омиває дріт, тим більше знижується його температура та, відповідно, змінюється електричний опір. Точність вимірювання досягається порівнянням опору основного дроту та контрольного, який знаходиться поза потоком повітря. Електричні показники про зміну опору вимірювального провідника надходить через контакти термоелемента 1 і колодку роз'єму 5 [9].

Принцип роботи таких термоанемометрів заснований на збільшенні тепловтрат нагрітого тіла при збільшенні швидкості його обдування більш холодним газом – зміни числа Нуссельта. Число Нуссельта  $N_u$  – це один з основних критеріїв подібності теплових процесів, що характеризує співвідношення між інтенсивністю теплообміну за рахунок конвекції та теплопровідності (в умовах нерухомого середовища), яке визначається за співвідношенням:



$$N_u = \frac{\alpha l}{\lambda} = \frac{q_c}{q_\lambda}, \quad (1)$$

де:  $l$  – характеристичний розмір;  
 $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі;  
 $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності середовища;  
 $q_c$  – тепловий потік за рахунок конвекції;  
 $q_\lambda$  – тепловий потік за рахунок теплопровідності.



*Рис. 1 – Термоанемометричний датчик витрати повітря:  
1 – термоелемент; 2 – корпус; 3 – трубка вимірювального блока;  
4 – захисна сітка; 5 – електричний роз'єм; 6 – платиновий дріт*

Чутливим елементом датчика є відкритий не ізольований тонкий металевий провідник (нитка розжарювання), що нагрівається вище температури середовища електричним струмом. Дріт виготовляється з металу з позитивним температурним коефіцієнтом опору – платини, або з вольфраму, ніхром, срібла та іншого металу. Опір нитки розжарювання залежить від зміни її температури, таким чином за зміною опору можна виміряти температуру. Температура нитки певним чином залежить від швидкості руху, густини та вологості повітря що її омиває. Нитка термодатчика включається у вимірювальну електронну схему. Залежно від методу включення датчика розрізняють прилади зі стабілізацією струму нитки, стабілізацією напруги та з термостатуванням нитки. У перших двох методах характеристикою швидкості є температура нитки, в останньому – потужність, необхідна для термостабілізації.

До недоліків термоанемометрів можна віднести низьку механічну міцність, оскільки застосовується вимірювальна нитка невеликого перетину. Інший недолік – порушення калібрування через забруднення та окислення гарячої нитки. Але, незважаючи на це, термоанемометри, тому що вони практично безінерційні, широко застосовуються в аеродинамічних експериментах для вимірювання локальної турбулентності та пульсацій газових потоків.

Принцип роботи плівкового датчика, зображеного на рисунку 2, багато в чому схожий з проволочним. Однак в його конструкції є кілька відмінностей. Замість платинового дроту в якості основного чутливого елемента встановлений кристал кремнію. Він має платинове наплення, яке складається з декількох тонких шарів (плівок). Кожен з шарів являє собою окремий резистор: нагрівальний; терморезистори (два); датчик температури повітря.

Кристал з напленням поміщається в корпус, який розміщується в каналі подачі повітря. Він має особливу конструкцію, яка дозволяє виконувати вимірювання температури не тільки на вході потоку, але й на виході потоку. Оскільки всмоктування повітря досягається за рахунок його розрідження в циліндрі двигуна, швидкість руху потоку дуже висока, що перешкоджає забруднюванню чутливого елемента [9].

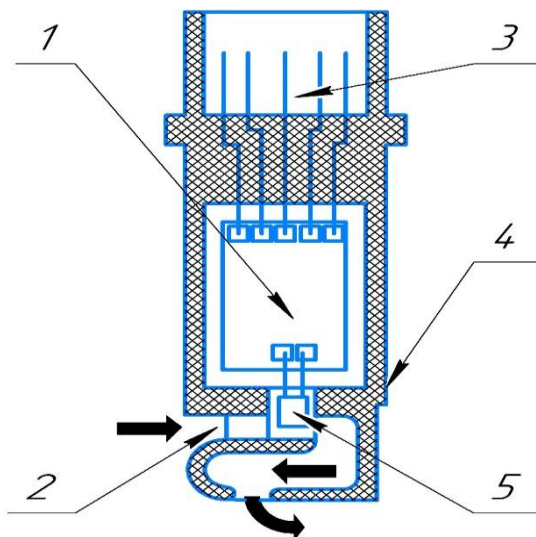


Рис. 2 – Схема плівкового датчика масової витрати повітря:

1 – електронний обчислювальний пристрій; 2 – вхід повітря; 3 – виводи електричного роз'єму; 4 – корпус; 5 – чутливий елемент.

Так само, як і в проволочному датчику, чутливий елемент плівкового нагрівається до певної заданої температури. У момент проходження повітря на терморезисторах виникає різниця температур, на основі якої розраховується маса потоку, що надходить з атмосфери (характеристика плівкового датчика в координатах маса повітря « $Q_n$ » – напруга « $U$ » наведена на рисунку 3). У таких конструкціях вихідний сигнал може бути представлений як в аналоговому форматі (вихідна напруга), так і в більш сучасному і зручному для обробки – цифровому.

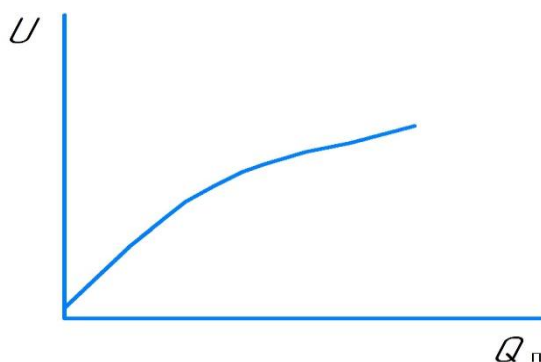


Рис. 3 – Характеристика плівкового датчика масової витрати повітря

В датчиках об'ємного типу принцип роботи побудований на отриманні відомостей про масу повітряного потоку шляхом зміни положення повзунка, який приводиться в дію спеціальною лопаткою, на яку впливає повітряний потік, що проходить крізь прилад Пневмодинамічний

витратомір ДОВП вимірює тиск в повітропроводі до і після перешкоди (наприклад дросельної заслінки). Величина перепаду тиску повітря до і після заслінки дає можливість визначити швидкість руху повітря по повітропроводу. Обчислювальний пристрій (ОП) по швидкості руху та густині повітря також визначає його масу. Кількість повітря, що проходить крізь впускний колектор дизеля за рівнянням Бернуллі має вигляд:

$$Q_{\Pi} = \varepsilon \cdot f_k \cdot v_{\Pi} \cdot \rho_{\Pi} \cdot \Delta t, \quad (2)$$

де:  $f_k$  – прохідний перетин впускного повітропровода;  
 $\rho_{\Pi}$  – густина повітря;  
 $\Delta t$  – тривалість вимірювання;  
 $v_{\Pi}$  – швидкість руху повітря:

$$v_{\Pi} = \varphi \sqrt{2(p_1 - p_2) / \rho_{\Pi}}, \quad (3)$$

де:  $p_1, p_2$  – тиск повітря до і після дроселя;  
 $\varepsilon, \varphi$  – коефіцієнти, які враховують масштабні та геометричні параметри.

Крім датчиків тиску, до складу пневматичних ДОВП входять датчик температури (для визначення густини повітря) та датчик кута повороту дросельної заслінки. Часто встановлюють один датчик тиску після дроселя. До пуску двигуна він заміряє тиск (атмосферний), який ОП запам'ятовує як  $p_1$ .

Прохідний перетин в патрубку зі зміною кута відкриття дроселя змінюється за досить складним законом. Ця залежність закладається в пам'ять ОП. Отримавши сигнали про кут повороту дроселя, про перепад тиску на ньому та температуру потоку, ОП обчислює витрату повітря.

#### Результати та методи дослідження

Розроблена методика визначення технічного стану циліндропоршневої групи тепловозного дизеля базується на застосуванні математичних методів інтерполяції, системного аналізу, теорії двигунів внутрішнього згорання та засобів програмування електронних контролерів.

Розглянуті типи датчиків, окрім переваг, мають ряд недоліків. До них можна віднести низьку механічну міцність, зменшення точності вимірів та забруднення чутливого елементу датчиків в процесі експлуатації, інерційність датчиків, високу собівартість та складність їх виробництва, необхідність використання додаткових вимірювачів та наявність рухомих частин, які зменшують надійність датчиків.

Для розв'язання задачі визначення залежностей масової витрати повітря  $Q$  через впускний  $f^1(\varphi)$  та випускний  $f^2(\varphi)$  тракти дизельного двигуна, яка віднесена до кута повороту колінчастого валу як

$$f^i(\varphi) = \frac{dQ}{d\varphi}, \quad (4)$$

з урахуванням таких обмежень: частота обертання колінчастого валу до 400 хв<sup>-1</sup>; повний об'єм циліндрів до 0,2 м<sup>3</sup>; продуктивність до 40 м<sup>3</sup>/хв, необхідно розробити систему вимірювань, яка володітиме достатньою механічною міцністю, необхідною потужністю та швидкодією.

Враховуючи особливості розглянутих типів датчиків, для вимірювання витрат повітря, при реалізації поставлених задач, доцільно використовувати датчики масової витрати повітря з термочутливими елементами та розробленою електронною схемою живлення і керування, яку наведено на рисунку 4. Цей датчик не має рухомих частин, має високу механічну міцність, мінімальну кількість первинних елементів для визначення масової витрати повітря. Його декілька підвищена інерційність достатня для розв'язання поставлених задач під час роботи у стаціонарних режимах двигунів внутрішнього згорання. Собівартість виготовлення такого датчика досить низька, оскільки він не має прецензійних елементів.

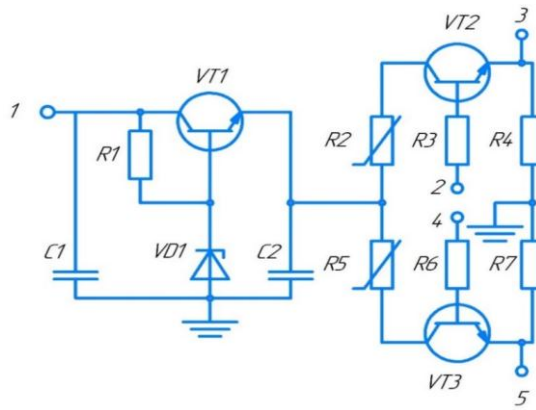


Рис. 4 – Електронна схема датчика вимірювання масової витрати повітря

Електронна схема датчика вимірювання масової витрати повітря складається з резисторів R1 (50 Ом), R2, R5 (0,5 кОм), R3, R6 (1 кОм), R4, R7 (3 Ом); стабілітрона VD1 з номінальною напругою 12 В та силою струму 100 мА; біполярних транзисторів VT1, VT2 і VT3. Для керування роботою даної схеми використовується мікроконтролер ATmega328P. Мікроконтролер ATmega328 являє собою 8-бітний мікроконтролер на базі ядра AVR RISC, має 32 кБ флеш-пам'яті для зберігання коду програми. ATmega328 має 2 кБ ОЗУ і 1 кБ EEPROM (яка читається і записується за допомогою бібліотеки EEPROM), 23 лінії вводу-виводу загального призначення, 32 робочі регістри загального призначення, три гнучкі таймери/лічильники з режимами порівняння, внутрішніми та зовнішніми перериваннями, послідовно програмований USART, байт-орієнтований 2-провідний послідовний інтерфейс, послідовний порт SPI, 6-канальний 10-бітний АЦП (8-канальний в пакетах TQFP та QFN/MLF) та п'ять режимів енергозбереження на вибір. Пристрій працює від 1,8-5,5 вольт напруги і досягає пропускну здатності, що наближається до 1 MIPS на 1 МГц. Програма керування датчиками масової витрати повітря наведена на рисунку 5.

В першому рядку програми, за допомогою функції «int», виконано визначення змінних програми, які можуть змінюватись в діапазоні від  $-2^{15}$  до  $2^{15}$  і враховують від'ємні значення та є цілими числами. Змінна «n» визначає кількість циклів вимірювань повітряного потоку для отримання значення масової витрати повітря з найменшою похибкою. В нашому випадку шляхом мінімізації похибки експериментально отримано значення «n = 100», що реалізовано в рядку № 17. Змінні «m» та «p» показують фактичне значення масової витрати повітря, визначене датчиками та перераховане передаточною функцією. Виведення цих даних реалізовано в рядках № 18 та № 20. Змінні «SensorValue1» та «SensorValue2» мають ті ж параметри, що й змінна «n». Вони визначають температуру нагріву термоелементів в режимі очікування. Ці значення отримуються з аналогових входів «A0» та «A1» і відповідають позиціям 3 та 5 рисунку 4. Значенню 100 °C нагріву термочутливих датчиків відповідає значення «45» на вимірювальному вході при 10-бітному розширенні аналогово-цифрового перетворювача [10]. Ця функція реалізована в рядках № 11 та № 12. В рядку № 4 виконується відкриття послідовного порту зі швидкістю 9600 біт/с. Цим портом надсилаються значення змінних «m» та «p». В рядках № 5 та № 6 визначаються виводи для керування транзисторами, які нагрівають термочутливі елементи (позиція 2, 4, та VT2, VT3 на рис. 4).



```

1      int n,m,p = 0;
2      int sensorValue1,sensorValue2=0;
3      void setup() {
4          Serial.begin(9600);
5          pinMode(3, OUTPUT);
6          pinMode(4, OUTPUT);
7      }
8      void loop() {
9          digitalWrite(3, 1);
10         digitalWrite(4, 1);
11         sensorValue1 = analogRead(A0);
12         sensorValue2 = analogRead(A1);
13         if (sensorValue1 < 45) {m++;}
14         else {digitalWrite(3, 0);}
15         if (sensorValue2 < 45) {p++;}
16         else {digitalWrite(4, 0);}
17         if (n==100) {
18             Serial.print(m);
19             Serial.print(";");
20             Serial.println(p);
21             n=0;
22             m=0;
23             p=0;
24         };
25         delay(1);
26         n++;
27     }

```

*Рис. 5 – Програма керування датчиками масової витрати повітря*

Функція «void loop()» визначає безкінечний цикл вимірювання перерахунку та виводу даних по масовій витраті повітря. Рядками № 9 та № 10 визначається подача короткочасного імпульсу на термочутливі елементи для визначення їх температури шляхом вимірювання напруги на відповідних резисторах R4 та R7 (рис.4). Отримані значення присвоюються змінним «sensorValue1» та «sensorValue2» в рядках № 13 та № 15. У випадку, якщо температура термочутливого елемента дорівнює  $100^{\circ}\text{C}$ , відповідний канал закриває транзистор та припиняє примусове нагрівання відповідного термочутливого елемента (рядки № 14 та № 16). У разі, якщо температура термочутливого елемента  $< 100^{\circ}\text{C}$ , то відповідний транзистор залишається відкритим та продовжується нагрів елемента. Після виведення поточних значень змінних « $m$ » та « $p$ » виконується їх обнуління (рядки № 22 та № 23). Функція «delay(1)» в рядку № 25 визначає тривалість вимірювань, нагрівання або охолодження термочутливих елементів та дорівнює 1 мс і заснована на алгоритмах реалізованих в [11].

Перевірка точності, адекватності роботи комплексу що пропонується для визначення технічного стану циліндропоршневої групи дизеля та оцінки достовірності результатів вимірювань планується провести на чотирьох- та шестициліндрових рядних дизельних двигунах.

### **Висновки**

Виконано огляд та аналіз характеристик різних типів датчиків масової витрати повітря. Враховуючи переваги та недоліки розглянутих датчиків, з урахуванням відсутності рухомих частин, високої механічної міцності, мінімальної кількості первинних елементів для визначення масової витрати повітря та досить низької собівартості виготовлення датчика, визначено найбільш оптимальний тип пристрою для вирішення поставлених задач з технічного діагностування циліндропоршневої групи тепловозного дизеля – термоанемометричний датчик.

Спроековано електронну схему датчика вимірювання масової витрати повітря на базі мікроконтролера ATmega328P з термочутливими елементами. Побудовано частину апаратно-програмного комплексу для визначення масової витрати повітря у циліндрах двигуна внутрішнього згорання. Визначено алгоритм роботи за яким комплекс виконує поставлені задачі. Розроблено програму керування контролером, яка забезпечує опитування датчиків масової витрати повітря та визначення значень параметрів технічного діагностування циліндропоршневої групи тепловозного дизеля.

Удосконалено метод нерозбірного діагностування силової енергетичної установки тепловозу за втратами свіжого заряду в циліндрах дизеля. На відміну від існуючих систем нерозбірного технічного діагностування застосування для визначення технічного стану циліндропоршневої групи дизеля згаданого апаратного комплексу з запропонованими термоанемометричними датчиками витрат повітря потребує значно меншого машинного часу на діагностичні роботи та

забезпечить високу точність вимірювання, що дасть можливість отримати економію матеріальних, людських та енергетичних ресурсів.

### *Література*

1. Босов А.А. Основная задача совершенствования системы планово-предупредительных ремонтов локомотивов / А.А. Босов, Е.Б. Боднар, А.И. Мосендз // Вісник Східноукр. нац.ун-ту. – 2001. – № 7 (41). – С. 93–97.
2. Боднар Б.Є. Методи нерозбірного діагностування дизелів при експлуатації рухомого складу / Б.Є. Боднар, О.Б. Очкасов, Д.В. Черняєв, О.Я. Децюра // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2012. – Вип. 41. – С. 63–67.
3. Скалозуб В.В. Автоматизований експертний комплекс із дослідження та прогнозування параметрів силових енергетичних установок локомотивів / В.В. Скалозуб, О.Б. Очкасов, Д.В. Кібець // Інформ.-керуючі системи на залізн. трансп. – 2020. – № 2. – С. 8–18.
4. Куков С.С. Диагностирование цилиндропоршневой группы по результатам оценки динамической компрессии / С.С. Куков, А.М. Плаксин, А.В. Гриценко, К.В. Глемба, А.Г. Карпенко, В.В. Руднев // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 11-2. – С. 300-305.
5. Кончаков Е.И., Техническая диагностика судовых энергетических установок : учеб. пособие / Е.И. Кончаков. – Владивосток : Изд - во ДВГТУ, 2007. – 112 с.
6. Капица М.И. Модели режимов диагностирования тягового подвижного состава с заменой комплектующих изделий / М.И. Капица, В.В. Лагута // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2013. – № 5. – С. 56-62.
7. Боднар Б.Є. Визначення методу фільтрації сигналу нерівномірності частоти обертання колінчастого вала дизеля / Б.Є. Боднар, О.Б. Очкасов, Д.В. Черняєв // Наука та прогрес транспорту : Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2013. – Вип. 1. – С. 113-118.
8. Диагностирование дизелей / Е. А. Никитин, Л. В. Станиславский, Э. А. Улановский и др. – М. : Машиностроение, 1987. – 224 с.
9. Палагута К.А. Микроконтроллеры в системах управления современных автомобилей / К.А. Палагута. – М. : МГИУ, 2007. – 217 с.
10. Макаричев Ю.А. Методы планирование эксперимента и обработки данных : учеб. пособие / Ю.А. Макаричев, Ю.Н. Иванников. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2016. – 131 с.
11. Use of the Wavelet Transform for the Analysis of Irregularity of Crankshaft Angular Velocity / B. Bodnar, O. Ochkasov, D. Chernyaev, R. Skvireckas. Transport Means 2018: Proc. of the 22nd Intern. Sci. Conf. (Oct. 03–05, 2018, Trakai, Lithuania) / Kaunas Univ. of Technology, Klaipėda Univ., JSC Lithuanian Railways (AB “Lietuvos Geležinkeliai”) [et al.]. Kaunas, 2018, pp. 962–967.

### **ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ**

#### **Капица Михайло Іванович,**

д.т.н., професор, завідувач кафедри «Локомотиви» Українського державного університету науки і технологій (УДУНТ).

Вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, 49010, Україна.

Тел.: +38 095 179 11 18.

E-mail: m.i.kapica@ua.fm.

ORCID: [orcid.org/0000-0002-3800-2920](https://orcid.org/0000-0002-3800-2920).

#### **Бобирь Дмитро Валерійович,**

к.т.н., доцент, доцент кафедри «Локомотиви» УДУНТ.

Вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, 49010, Україна.

Тел.: +38 050 964 96 42.

E-mail: dmitrob@ua.fm.

ORCID: [orcid.org/0000-0003-1441-3861](https://orcid.org/0000-0003-1441-3861).

**Кислий Дмитро Миколайович,**  
к.т.н., доцент, доцент кафедри «Локомотиви» УДУНТ.  
Вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, 49010, Україна.  
Тел.: +38 066 625 18 59.  
E-mail: dmitriykisliy@gmail.com.  
ORCID: orcid.org/0000-0002-4427-894X.

**Богомолов Андрій Русланович,**  
аспірант кафедри «Локомотиви» УДУНТ.  
Вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, 49010, Україна.  
E-mail: bogomolov1811@gmail.com.  
ORCID: orcid.org/0000-0003-1972-9726.

## **«ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ УКРАЇНИ» ПЕРЕДПЛАТА НА ВИДАННЯ**

Оформити передплату на **науково-практичний журнал «Залізничний транспорт України»** по кварталах і на весь 2022 рік можливо у кожному поштовому відділенні України за **Каталогом видань України «Преса поштою»** або на **офіційному сайті ДП «Преса» [www.presa.ua](http://www.presa.ua)**.

Періодичність видання журналу – 4 рази на рік.

**Передплатний індекс: для індивідуальних передплатників – 74126, для підприємств і організацій – 40294.**

Передплату підприємства та фізичні особи можуть також **оформити передплату на договірних умовах у видавця журналу** філії «НДКТІ» АТ «Укрзалізниця» за зверненням до директора по адресу:

**03038, м. Київ, вул. Івана Федорова, 39.**

**Електронна пошта: [ztu1520mm@gmail.com](mailto:ztu1520mm@gmail.com).**

**Тел.: +38 (044) 465-38-11; +38 (044) 309-68-93.**

*Кандидаты техн. наук* Зонов В. Д., Матяш В. А.  
*Инженеры* Белоус Ю. А., Польшников Ю. В., Левцов В. Б

## **ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ В ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОЗНОГО ДИЗЕЛЯ НА УСТАНОВИВШИХСЯ И ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ**

**Ключевые слова:** математическая модель, переходной процесс, дизель, тепловоз, система автоматического регулирования СУДМ-01, расход топлива, коэффициент влияния переходного процесса.

### **Вступление**

Известно, что переходным процессом тепловозного двигателя внутреннего сгорания (ДВС) называется процесс перехода из одного установившегося состояния в другое под влиянием управляющих или возмущающих воздействий. Совокупность переходных процессов, следующих один за другим, в теории ДВС характеризуются, как неустойчившиеся режимы [1, 8, 10, 11, 13].

В зависимости от характера и величины изменения нагрузки и частоты вращения коленчатого вала переходные процессы можно разделить на два типа:

- а) переходные процессы, связанные с изменениями нагрузки и частоты вращения коленчатого вала при переводах рукоятки контроллера машиниста из одного положения в другое;
- б) переходные процессы, связанные с колебаниями нагрузки при неизменном положении рукоятки контроллера. Такие колебания возникают в связи с изменениями внешних условий или мощности вспомогательных агрегатов силовой установки тепловоза (включение или выключение тормозного компрессора, вентиляторов и т. д.).

Рабочий процесс тепловозного дизеля на переходных режимах вследствие инерционности (запаздывания) системы автоматического регулирования (САР), влияющей на процесс топливоподачи, запаздывания раскрутки ротора турбокомпрессора и, соответственно, неудовлетворительного воздухообеспечения цилиндров протекает с низкими индикаторными показателями [2, 10, 11].

Экспериментальные исследования индикаторных показателей рабочего процесса дизелей маневровых и магистральных тепловозов на переходных режимах [1, 10] свидетельствуют о том, что оптимальные показатели рабочего процесса достигают качественных значений через 18-20 секунд после начала переходного процесса. При этом, в течение 18-20 секунд работа дизель-генераторной установки (ДГУ) тепловоза сопровождается увеличением расхода топлива и повышенным выбросом токсических составляющих в отработавших газах в окружающую среду [9, 10].

Консолидированное мнение отечественных и зарубежных учёных в области тепловозного дизелестроения сходится в том, что улучшение индикаторных показателей, топливной экономичности и снижения токсичности отработавших газов тепловозных дизелей на переходных режимах обеспечивается путём совершенствования электронных систем управления, регулирования частоты вращения коленчатого вала и мощности ДВС, а также качеством работы систем управления топливоподачей [6, 7, 12, 15, 16].

### **Анализ результатов ранее проведенных исследований и публикаций**

В последние годы на железнодорожном транспорте активно внедряются микропроцессорные системы автоматического регулирования (САР) и управления, позволяющие реализовывать актуальные задачи регулирования и управления тепловозными дизелями [3, 9, 12, 14, 15, 16, 17]. Использование этих систем позволяет повысить качество регулирования дизель-генераторов тепловозов во всём диапазоне частот вращения и мощности, включая переходные режимы.

Одним из эффективных и надёжных систем регулирования частоты вращения является электронный регулятор типа СУДМ-01 для тепловозных дизелей 5Д49 и К6С310DR. Эффективность этого электронного регулятора обеспечивается за счёт его многофункционального программного обеспечения с оптимальными алгоритмами управления, позволяющими повысить эффективность работы тепловозного дизеля на всех режимах эксплуатации, с частыми изменениями скоростных и нагрузочных режимов работы [15, 16, 17].

В тепловозных дизелях, характеризующимися частыми изменениями скоростных и нагрузочных режимов работы, микропроцессорные системы электронного управления обеспечивают формирование необходимых статических и динамических характеристик [8, 9], точность регулирования и динамические качества ДВС, формирование качественного процесса топливоподачи, повышение индикаторных и эксплуатационных показателей двигателя на всех его режимах работы, включая переходные режимы [9, 12, 13].

Анализ результатов исследований переходных процессов ДВС, приведенных в работах [1, 6, 7, 9, 10, 13], показывает, что индикаторные и эффективные параметры работы ДГУ на неустановившихся режимах тепловозов значительно отличаются от их значений на установившихся режимах. На неустановившихся режимах снижается мощность ДГУ, увеличивается расход топлива, сопровождающийся повышенной дымностью и токсичностью выпускных газов [3, 8].

Снижение индикаторных и эффективных показателей ДГУ на неустановившихся режимах объясняется инерционностью регулятора частоты вращения вала дизеля и запаздыванием (инерционностью) раскрутки ротора турбокомпрессора (ТК). Инерционность регулятора частоты вращения коленчатого вала дизеля и его мощности сопровождается изменением статических коэффициентов передачи и динамических постоянных времени [1, 2, 10, 13] управления и регулирования режимов работы ДВС рейкой топливного насоса высокого давления (ТНВД), на переходных режимах. В начале переходного режима рейка ТНВД перемещается на максимальную подачу цикловых порций топлива в цилиндры двигателя, а через определённый интервал времени рейка устанавливается в положение, соответствующее заданной позиции контроллера машиниста (КМ).

По данным авторов публикаций [1, 2, 8], общая продолжительность работы дизеля маневрового тепловоза на переходных режимах достигает 20–40 % от общего времени его работы. В то же время продолжительность работы дизеля магистрального тепловоза на переходных режимах составляет порядка 15–20 % [1, 2, 10, 12]. При этом, за 10–12 ч работы маневрового локомотива количество переключений  $n$  позиций контроллера машиниста (КМ) на переходных режимах может достигать 1000–2500 переключений, а у магистрального локомотива - 450–500 переключений [1].

В работах [11, 12, 13] авторы обращают внимание на качество регулирования частоты вращения коленчатого вала дизеля и мощности тяговой передачи на переходных режимах с помощью электронной системы управления впрыском топлива (ЭСУВТ). Отмечается, что ЭСУВТ реализует оптимальное управление частотой вращения и мощности ДГУ на переходных режимах путём обеспечения максимального быстродействия (при заданных ограничениях) на угловое ускорение коленчатого вала и заданных параметрах рабочего процесса дизеля, с максимально допустимыми величинами температуры и давления рабочего тела в цилиндре [2, 8, 11, 12].

Приведенные в работах [2, 12, 13] положительные результаты влияния ЭСУВТ на качество рабочего процесса дизелей и топливную экономичность маневровых тепловозов на всех диапазонах частоты вращения коленчатого вала и изменения мощности двигателя, включая переходные режимы, вызывают сомнение в части обеспечения необходимой равномерности и стабильности впрыска цикловой порции топлива в цилиндр электрогидравлическим клапаном ТНВД на режимах холостого хода и малых нагрузок. Электрогидравлический клапан вытесняет объём топлива, сформированный программным обеспечением электронной системы управления впрыска топлива, от топливного насоса высокого давления по трубопроводу высокого давления к распыливающим отверстиям распылителя штатной форсунки. Цикловая порция топлива перемещается от ТНВД к распыливающим отверстиям распылителя штатной форсунки со скоростью ударной волны, прямо пропорциональной зависимости от сжимаемости дизельного



топлива, величины деформации стенок трубопровода, определяемой модулем упругости материала, длины и диаметра топливного тракта во всех сечениях линии нагнетания топлива тепловозного дизеля [19]. Ударная волна, при своём перемещении по топливопроводу трансформируется (эволюционирует) в короткие ударные импульсы давления длительностью 300-500 мкс. Амплитуда импульсов давления существенно превышает амплитуду ударной волны сформированной ЭСУВТ для подачи цикловой порции топлива. Импульс давления топлива, перемещаясь по трубопроводу высокого давления от ТНВД до распылителя форсунки (Лтвд = 1000 мм) и далее, при поднятии иглы распылителя форсунки теряет свою энергетическую (кинетическую) энергию в колодце распылителя, объём которого превышает в несколько раз объём цикловой порции топлива. Потеря величины импульса давления за запорным конусом иглы распылителя в колодце распылителя приводит к пропускам впрыска топлива, неравномерности подачи впрыскиваемого топлива по циклам и цилиндрам в переходных процессах, снижению индикаторных параметров рабочего процесса на режимах холостого хода (см. рис.2), а также к увеличению вибрации дизеля и тепловоза в целом [9, 16].

Чтобы обеспечить качество рабочего процесса дизелей К6S310DR и ПДГ1М маневровых тепловозов серий ЧМЭЗ и ТЭМ18 на ненормальных режимах работы, программное обеспечение ЭСУВТ осуществляет подстройку цикловых порций топлива, обеспечиваемых электрогидравлическим клапаном, при соответствующей частоте вращения коленчатого вала двигателя для 5-6 позиций контроллера машиниста. По результатам испытаний выполненных 15.03.2013 г. в локомотивном депо Пенза-3 на маневровом тепловозе ТЭМ18ДМ-435, при снижении ЭСУВТ частоты вращения коленчатого вала дизель-генератора ПДГ1М до  $n = 230-300 \text{ min}^{-1}$  и отсутствии подстройки подачи цикловых порций топлива возрастает уровень вибрации дизель-генератора и тепловоза в целом до величин превышающих установленные ГОСТом нормы. Опыт эксплуатации ЭСУВТ на магистральных тепловозах, приведенный в открытой печати, нами не обнаружен.

В работах [15, 16] рассматривается компьютерная модель работы ДГУ тепловоза с электронной системой управления СУДМ-01. Особое внимание в компьютерной модели уделяется влиянию запаздывания (инерционности) частоты вращения коленчатого вала дизеля на показатели качества регулирования мощности дизель-генераторной установки, включая переходные режимы. В рассматриваемой компьютерной модели электронная система управления позволяет достаточно просто и эффективно поддерживать задаваемую частоту вращения коленчатого вала ДГУ на всех частотах его вращения и реализуемой мощности, включая переходные режимы.

#### **Постановка задачи исследований**

Целью проведенного исследования являлось математическое моделирование и экспериментальное исследование переходных процессов дизель-генератора тепловоза, оборудованного форсунками специальной конструкции с гидродинамическим запирающим устройством и электронной системой управления частоты вращения коленчатого вала СУДМ-01, обеспечивающими устойчивый процесс топливоподачи на всех частотах вращения вала двигателя и реализуемой мощности, включая переходные режимы.

#### **Результаты выполненных исследований**

Математическое моделирование переходных процессов тепловозных дизелей проводилось на базе компьютерной модели с электронной системой управления двигателем СУДМ-01 [15, 16] и форсунок специальной конструкции [4], обеспечивающих способ (закон) топливоподачи в цилиндры двигателя без пропусков впрыска топлива и с минимальной неравномерностью подачи впрыскиваемого топлива по циклам и цилиндрам на всех частотах вращения коленчатого вала и реализуемой мощности ДГУ локомотива, включая переходные режимы. В электронной системе управления СУДМ-01 применена самонастраивающаяся адаптивная микропроцессорная система регулирования частоты вращения коленчатого вала тепловозной ДГУ. Задаваемая частота вращения автоматически учитывает статические и динамические параметры регулирования ДГУ. Микропроцессор электронной системы управления позволяет обеспечить требуемое качество регулирования частоты вращения коленчатого вала на всех режимах работы ДГУ тепловоза.

Автоматическая настройка электронной системы управления СУДМ-01 обеспечивает стабильность частоты вращения коленчатого вала и реализацию необходимой мощности

тепловозного дизеля на каждой позиции контроллера машиниста, что обеспечивается выходом рейки топливного насоса ТНВД в положение точно соответствующее необходимой цикловой порции топлива в цилиндры для заданного режима работы двигателя. Импульс давления заданной цикловой порции топлива, перемещаясь по топливопроводу к форсунке специальной конструкции в её гидродинамическом запирающем устройстве модулирует количество импульсов давления [19, 20], соответствующее режиму номинальной мощности дизеля К6S310DR или ПДГ1М, при этом импульсы обеспечивают устойчивый, без пропусков, впрыск топлива и требуемую равномерность его подачи по циклам и цилиндрам, с заданным способом (законом) топливоподачи на режиме холостого хода (рис. 1). Распылитель форсунки с гидродинамическим запирающим устройством, являясь заключительным элементом топливной аппаратуры, формирует устойчивый способ (закон) подачи топлива в цилиндры дизеля на всех частотах вращения его коленчатого вала и реализуемой мощности, включая переходные режимы [4, 5, 6].

Математическое моделирование и экспериментальное исследование процессов подавления возникающих колебаний в электронной системе управления частотой вращения коленчатого вала дизеля на различных режимах работы ДГУ, включая переходные процессы, проводилось с помощью приведенного дифференциального уравнения:

$$T_t^2 \frac{d^2 q}{dt^2} + T_k \frac{dq}{dt} + K_q q = \psi + Q_j \cdot \varphi, \quad (1)$$

где:  $T_t$  – продолжительность (по координате на индикаторной диаграмме) действительного начала впрыска заданной цикловой порции топлива в цилиндр двигателя, сек.;

$T_k$  – продолжительность (по координате на диаграмме) подачи заданной цикловой порции топлива в цилиндр двигателя, сек.;

$K_q$  – коэффициент подавления распылителями форсунок с гидродинамическим устройством колебаний возникающих в электронной системе управления СУДМ-01;

$Q_j$  – коэффициент степени неравномерности процесса топливоподачи распылителями форсунок с гидродинамическим запирающим устройством;

$\varphi$  – угол опережения впрыска топлива в цилиндр двигателя;

$q$  – координата окончания действительного впрыска в цилиндр цикловой порции топлива;

$\psi$  – коэффициент перемещения рейки ТНВД, который определялся по формуле:

$$\psi = \Delta h / h \quad (2)$$

где:  $\Delta h$  – перемещение рейки ТНВД соответствующее настройке электронной системы управления впрыском цикловой порции топлива;

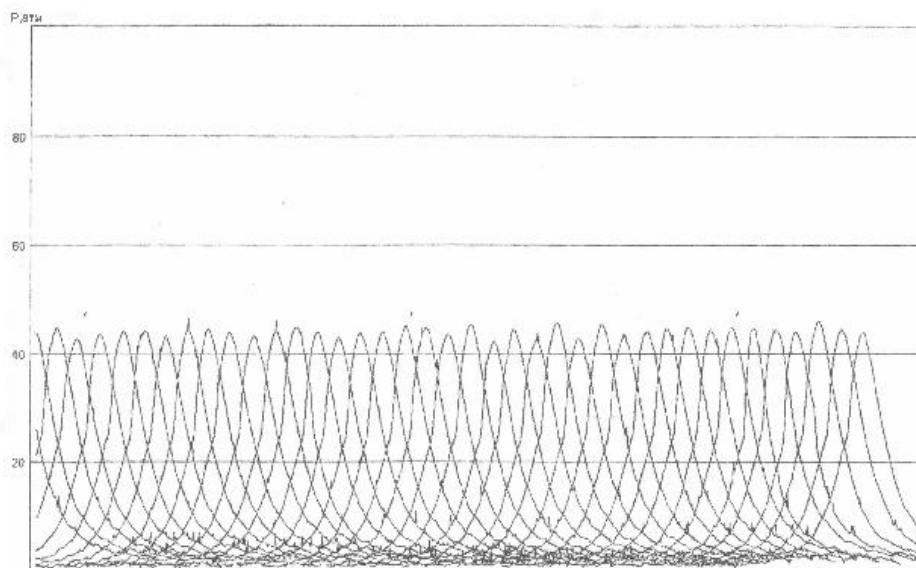
$h$  – положение рейки ТНВД в равновесном режиме, характеризующее момент подавления колебания впрыскиваемой цикловой порции топлива, предшествующий переходному процессу.

Решение дифференциального уравнения (1), проводилось известными методами: путем преобразований частных производных Эйлера для однородных дифференциальных уравнений. Использование этого дифференциального уравнения позволило установить момент возникновения и подавления колебаний в электронной системе управления частотой вращения коленчатого вала двигателя, вызванных неравномерностью рабочего процесса дизеля К6S310DR в переходных процессах на режимах холостого хода.

Экспериментальные исследования процессов в момент возникновения колебаний в системе автоматического регулирования частоты вращения СУДМ-01 и их подавления способом (законом) сформированным форсунками специальной конструкции [4] (являющихся заключительным элементом в системе топливоподачи дизеля), проводились на экспериментальном железнодорожном кольце АО «ВНИИЖТ» в г. Щербинка, на Днепропетровском тепловозоремонтном заводе (ЧАО «ДТРЗДніпро») и в локомотивном депо Пенза-3 ОАО «РЖД».

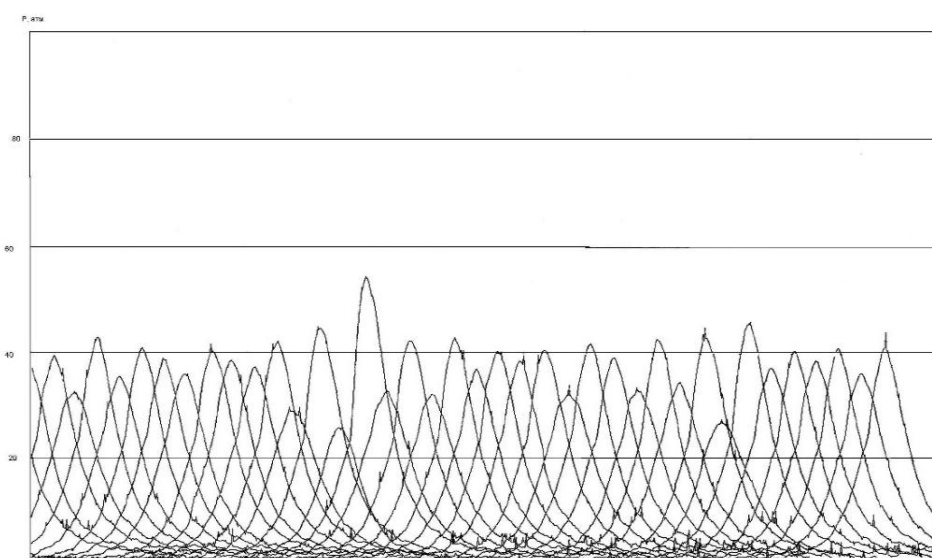
Результаты экспериментальных исследований подтверждены соответствующим актом внедрения и представлены на индикаторных диаграммах рабочего процесса режима холостого хода дизель-генератора К6S310DR, при его оборудовании форсунками специальной конструкции и штатными форсунками (рис. 1 и 2). По этим же диаграммам определялись коэффициенты для дифференциального уравнения (1).

Анализ индикаторной диаграммы рабочего процесса холостого хода дизель-генератора K6S310DR, оборудованного “Форсунками специальной конструкции”, свидетельствует о том, что переходные процессы дизеля имеют степень неравномерности 0,7 %, при среднем максимальном давлении сгорания  $P_z$  по циклам на режиме холостого хода,  $P_z = 4,39$  МПа.



*Рис.1 – Индикаторная диаграмма рабочего процесса холостого хода дизель-генератора K6S310DR маневрового тепловоза ЧМЭЗ, оборудованного “Форсунками специальной конструкции”*

Анализ индикаторной диаграммы рабочего процесса холостого хода дизель-генератора K6S310DR оборудованного штатной топливной аппаратурой показал, что его переходные процессы имеют степень неравномерности 9,2 %, при среднем максимальном давлении сгорания по циклам, на режиме холостого хода, равном  $P_z = 3,83$  МПа.



*Рис.2 – Индикаторная диаграмма рабочего процесса холостого хода дизель-генератора K6S310DR маневрового тепловоза ЧМЭЗ, оборудованного штатной топливной аппаратурой*

Среднее максимальное давление сгорания по циклам на режиме холостого хода дизель-генератора K6S310DR оценивалось по разности давления сгорания цикловых порций топлива, на установившихся и неуставившихся режимах работы, с помощью выражения:

$$\Delta q_{\text{ц}} = J_{\Sigma} \frac{dP_{\Gamma}}{dt} \left( \frac{\partial M_{\Gamma}}{\partial \omega_{\text{д}}} \omega_{\text{д}} + M_{\Gamma} \right)^{-1} H_{\text{у}}^{-1} \eta_{\text{е}}^{-1} \omega_{\text{д}}^{-1} z \tau \quad (3)$$

где:  $J_{\Sigma}$  – момент инерции вращающихся масс дизель-генератора и вспомогательного оборудования тепловоза с приводом от дизеля;

$P_{\Gamma}$  – мощность тягового генератора;

$t$  – время;

$M_{\Gamma}$  – момент, передаваемый двигателем валу генератора;

$\omega_{\text{д}}^{-1}$  – угловая скорость коленчатого вала дизеля;

$H_{\text{у}}^{-1}$  – теплотворная способность топлива;

$\eta_{\text{е}}^{-1}$  – эффективный КПД дизеля в установившемся режиме;

$z$  – число цилиндров дизеля;

$\tau$  – коэффициент тактности дизеля.

Исследования влияния количества переходных процессов (ПП) дизеля на величину его расхода топлива проводилось с помощью коэффициента переходного процесса  $K_n$ , позволяющего определить не только величину расхода топлива, но и энергетическую характеристику импульса давления впрыскиваемой единичной цикловой порции топлива [5], перемещающейся от ТНВД к распыливающим отверстиям распылителя форсунки с гидродинамическим запирающим устройством (принцип Даламбера для материальной точки).

Теоретическое значение коэффициента переходного процесса получено из предположения равенства расчетного расхода топлива дизелем на всех режимах работы дизель-генератора K6S310DR, скорректированного на коэффициент  $K_n$ , и расхода топлива измеренного аппаратно-программным комплексом, с учетом степени влияния ПП на режимах нагрузки и холостого хода [1]. Коэффициент переходного процесса представлен формулой:

$$\left( \sum_{i=0}^8 b_{xi} t_{xi} + \sum_{i=1}^8 b_{ni} N_i t_{ni} \right) K_{\text{п}} = \left( \sum_{i=0}^8 b_{xi} t_{xi} + \sum_{i=1}^8 b_{ni} N_i t_{ni} \right) + \sum_{i=0}^8 b_{xi} (d_x - 1) n t_{\text{п}} K_x + \sum_{i=1}^8 b_{ni} (d_n - 1) n t_{\text{п}} K_{\text{п}} \quad (4)$$

где:  $i$  – номер позиции контроллера машиниста;

$b_{xi}$  – расход топлива по позициям контроллера машиниста (КМ) в режиме холостого хода, кг/ч;

$b_{ni}$  – расход топлива по позициям КМ в режиме нагрузки, кг/кВт·ч;

$t_{xi}$ ,  $t_{ni}$  – время работы ДГУ тепловоза по позициям контроллера машиниста в режиме холостого хода и под нагрузкой, соответственно, ч;

$t_n = 0,0013$  – установленное время переходного процесса, ч;

$d_x$ ,  $d_n$  – доля переходных процессов, приходящихся на режим холостого хода и режим нагрузки;

$K_x$ ,  $K_n$  – коэффициенты влияния переходных процессов на увеличение расхода топлива в режиме холостого хода и нагрузки, соответственно;

$N$  – мощность ДГУ тепловоза по позициям КМ, кВт;

$n$  – количество переходных процессов.

После соответствующих преобразований коэффициент переходного процесса принимает вид:

$$K_n = 1 + \frac{\sum_{i=0}^8 b_{xi} (d_x - 1) n t_{\text{п}} K_x + \sum_{i=1}^8 b_{ni} (d_n - 1) n t_{\text{п}} K_{\text{п}}}{\sum_{i=0}^8 b_{xi} t_{xi} + \sum_{i=1}^8 b_{ni} N_i t_{ni}} \quad (5)$$

Экспериментальные исследования влияния количества переходных процессов на величину расхода топлива дизеля K6S310DR, установленного на маневровом тепловозе ЧМЭЗ, проводились (помимо исследований на экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ», г. Щербинка)

на реостатной станции ЧАО «ДТРЗ Дніпро», а также при опытных поездках на заводских путях этого предприятия.

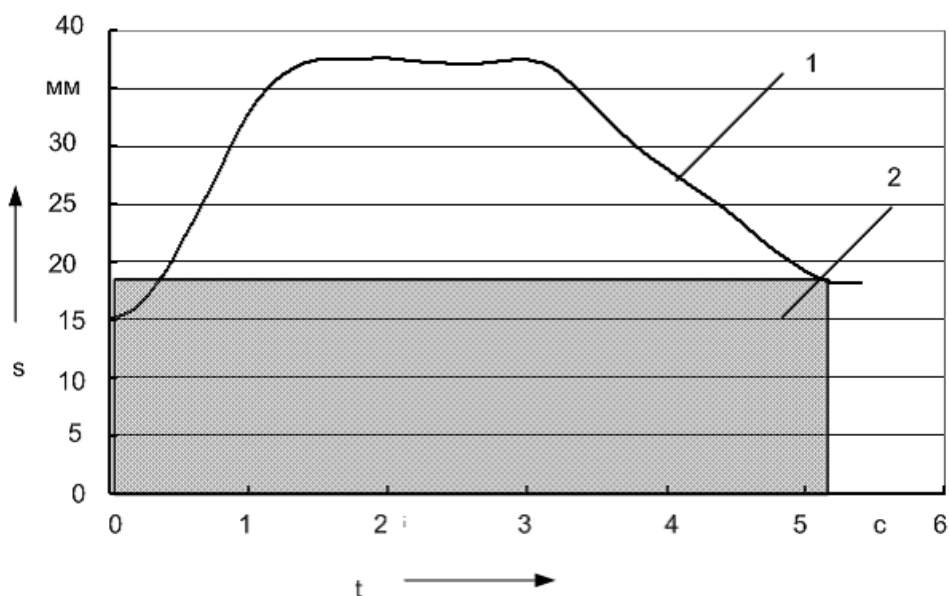
Для экспериментальной оценки влияния количества переходных процессов на величину расхода топлива тепловозным дизелем, на рейку его топливного насоса устанавливался индуктивный датчик, фиксирующий выход рейки ТНВД с дискретностью 0,1 мм и максимальным перемещением до 40 мм. Результаты измерений перемещения реек насоса фиксировались аппаратно-программным комплексом [18], через каждые 0,01 с. Набор позиций контроллером машиниста производился от минимальной до максимальной и обратно, с выдержкой необходимого времени, для стабилизации процесса подачи топлива, на каждом переходном режиме. Позиции контроллера машиниста также фиксировались аппаратно-программным комплексом [18]. Так как выход рейки топливного насоса пропорционален цикловой подаче топлива, то для оценки степени влияния количества переключений на расход топлива дизелем достаточно сравнить площади фигур приведенных на графике изменения длительности переходного процесса (рис. 3), ограниченных линией 1 при переходном процессе, и прямоугольником 2, характеризующим расход топлива при установившемся процессе.

Формула теоретического расчёта площади  $S$  фигуры, ограниченной линией 1 (см. рис. 3), характеризующей выход рейки ТНВД при переходном процессе и площади фигуры, ограниченной прямоугольником 2, характеризующим расход топлива при установившемся процессе, приведена в виде полинома Лагранжа пятой степени:

$$H(t) = \sum_{i=0}^5 h_i \prod_{j=0, j \neq i}^5 \frac{t-t_j}{t_1-t_j} \quad (6)$$

Общая площадь  $S$ , включающая фигуру ограниченную линией 1 и фигуру, ограниченную прямоугольником 2, получена интегрированием полинома на временном интервале 0-5 с.

$$S = \int_0^5 H(t) dt \quad (7)$$



*Рис. 3 – Фрагмент результатов исследования длительности переходного процесса при наборе-сбросе с 0 до 8 позиции контроллера машиниста тепловозного дизеля K6S310DR*

В результате обработки полученных экспериментальных данных установлено, что длительность переходного процесса при наборе-сбросе с 0 до 8 позиции контроллера машиниста тепловозного дизеля K6S310DR в среднем составляет 5 с (см. рис.3), а количество переключений контроллера машиниста за смену находится в пределах 1500 переключений. Анализ регрессионной зависимости  $K_p = f(n)$  (5) позволяет утверждать, что сходимость теоретических и



экспериментальных исследований влияния ПП на расход топлива дизеля K6S310DR находится в пределах 92-98 %. Математическое ожидание увеличения расхода топлива на ПП в режиме нагрузки относительно установившегося режима находится в пределах 5 %, а в режиме холостого хода – 3%.

Результаты теоретического моделирования и экспериментального исследования количества переходных процессов от 0 до 1500 на режимах работы тепловозных дизелей и оценки соотношения доли переходных процессов в режимах нагрузки и холостого хода  $dn, dx(dn + dx = 1)$  позволяет сделать вывод, что за счёт применения на дизелях K6S310DR маневрового тепловоза ЧМЭЗ электронной системы автоматического регулирования частотой вращения коленчатого вала СУДМ-01 и форсунок специальной конструкции, обеспечивающих устойчивый способ (закон) топливоподачи), величина увеличения расхода топлива дизелем на переходных режимах не превышает 1,0-1,5 %, от общего расхода топлива тепловоза за смену, что входит в погрешность измерений.

### **Выводы**

1. Разработана математическая модель исследования переходных процессов тепловозных дизелей, оборудованных форсунками специальной конструкции и электронной системой автоматического управления частотой вращения коленчатого вала двигателя СУДМ-01, обеспечивающих устойчивый способ (закон) топливоподачи на всех частотах вращения вала дизеля и изменениях его мощности, включая переходные режимы.

2. Индицирование рабочего процесса тепловозного дизеля K6S310DR, оборудованного форсунками специальной конструкции, подтверждает устойчивый, без пропусков впрыска и его неравномерности, способ (закон) топлива в цилиндры двигателя на переходных режимах его работы, с неравномерностью рабочего процесса 0,7 %, при среднем максимальном давлении сгорания  $P_z$  по циклам и цилиндрам на режиме холостого хода  $P_z = 4,39$  МПа.

3. При оборудовании дизеля K6S310DR штатным регулятором частоты вращения его вала и штатной топливной аппаратурой индицирование его рабочего процесса свидетельствует о крайне неустойчивой топливоподаче в цилиндры двигателя на переходных режимах работы, с пропусками впрыска топлива и неравномерностью рабочего процесса 9,2 %, при среднем максимальном давлении сгорания  $P_z$  по циклам на режиме холостого хода  $P_z = 3,83$  МПа.

4. Представленная инновационная математическая модель расчёта и исследования коэффициента влияния переходных процессов работы тепловозного дизеля, оборудованного форсунками специальной конструкции и электронной системой автоматического регулирования СУДМ-01, позволяет оценить его воздействие на расход топлива двигателем.

### **Литература**

1. Овчаренко С. М. Влияние переходных процессов на расход топлива дизелем в эксплуатации / С.М. Овчаренко, И.С. Корнеев, В.А. Четвергов // Известия Транссиба. – 2012. – №1(9). – С. 27-325.

2. Коссов Е. Е. Оптимизация режимов работы тепловозных дизель-генераторов / Е.Е. Коссов, С.И. Сухопаров. – М.: Интекст, 1999. – 184 с.

3. Коссов Е.Е. Совершенствование качества переходного процесса при смене режима работы дизель-генератора тепловоза / Е.Е. Коссов Е.Е., В.В. Фурман // Вестник ВНИИЖТ. – 2012. – № 2. – С. 27–30.

4. Пат. WO 2014/142775A1, международный. F02M 45\08 (2006/01), F02M 53/04 (2006/01). Распылитель форсунки специальной конструкции двигателя внутреннего сгорания / В.Д. Зонов; заявитель и патентообладатель В.Д. Зонов; заявл. 14.03.2013; опубл. 18.09.2014 WIPO/РСТ.

5. Математичне моделювання витрат палива маневровими локомотивами / В.Д. Зонов, М.И. Данько, Т.В. Бутько, М.П. Топчиев // Залізничний транспорт України. – 2004. – № 3. – С. 29-32.

6. Зонов В.Д. Математичне моделювання та дослідження енергетичних характеристик паливоподачі у форсунках спеціальної конструкції / В.Д. Зонов // Міжвузівська збірка наукових праць. – Харків : ХарДАЗТ, 2005. – Вып. 70. – С. 112-123.

7. Зонов В.Д. Математичне моделювання процесу паливоподачі у форсунках спеціальної конструкції / В.Д. Зонов, С.А. Ерощенко, О.Л. Григорьев // Збірник наукових праць. – Харків : ХарДАЗТ, 2001. – Вип. № 45. – С. 82-88.
8. Епишин А.Ю. Статические характеристики и переходные процессы дизель-генераторной установки тепловоза / А.Ю. Епишин [и др.] // Двигателестроение. – 2017. – № 3. – С. 3-8.
9. Плахов С.В. Моделирование системы автоматического регулирования частоты вращения дизельного двигателя / С.В. Плахов [и др.] // Известия высших учебных заведений : Машиностроение. – 2019. – № 7. – С. 35-46.
10. Соболев В.Н. Улучшение переходных процессов тепловозных дизелей 10Д100 и Д70 / В.Н. Соболев, Е.Г. Заславский, В.В. Погребняк // Электрическая и тепловозная тяга. – 1970. – № 11. – С. 44-45.
11. Коссов Е.Е. Экспериментальное исследование переходных процессов тепловозных дизелей и систем автоматического регулирования / Е.Е. Коссов, И.Л. Поварков // Труды ВНИИЖТ. – 1977. – Вып. 570. – С. 71-93.
12. Коссов Е.Е. Микропроцессорная система регулирования дизель-генератора / Е.Е. Коссов [и др.] // Локомотив. – 2002. – № 3. – С. 48-50.
13. Епишин А.Ю. К вопросу повышения топливной экономичности дизель-генераторов тепловозов в переходных режимах управления / А.Ю. Епишин // Естественные и технические науки. – 2013. – № 1. – С. 373-376.
14. Пойда А.М. Моделювання перехідних процесів тепловозного дизеля в експлуатаційному циклі з метою встановлення шляхів зниження витрат палива. / А.М. Пойда, Д.Г. Сівих, Р.М. Карсекін // Наук.-тех. звіт. № 0199U003102. – Харків. – ХарДАЗТ. – 2001. – № 96. – С. 5-6.
15. Богаевский А.Б. Компьютерная модель мощного транспортного дизель-генератора с электронной системой управления. / А.Б. Богаевский // Открытые информационные и компьютерные интегральные технологии. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2008. – Вып. 38. – С. 150–169.
16. Богаевский А.Б. Модернизация системы управления подачей топлива тепловозного дизель-генератора / А.Б. Богаевский, А.А. Прохоренко // Вісник НТУ «ХПІ». – 2017. – № 1. – С. 3–7.
17. Кирьянов А.Н. Эффективность работы тепловозов с электронной системой управления впрыском топлива / А.Н. Кирьянов // Локомотив. – 2014. – № 1. – С. 34–37.
18. Зонов В.Д. Методология измерения массы топлива аппаратно-программным комплексом тепловоза / В.Д. Зонов, В.О. Матяш, Ю.В. Польшников, В.Б. Левцов // Залізничний транспорт України. – 2021. – № 3. – С. 53–66.
19. Основы гидравлики и аэродинамики : учебн. для техн. и колл. / В.И. Калицун [и др.]. – Москва: «Стройиздат», 2001. – 296 с.
20. Накоряков В.Е. Усиление амплитуды волн давления в парожидкостной среде пузырьковой структуры / В.Е. Накоряков, Е.С. Вассерман, Б.Г. Покусаев, Н.А. Прибатурин // Теплофизика высоких температур. – 1994. – Т.32, № 3. – С. 411–417.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

#### **Зонов Виктор Дмитриевич,**

к.т.н, доцент, инженер-технолог структурного подразделения  
«Полтавское проектно-конструкторское-технологическое бюро  
по ремонту локомотивов» (СП «Полтавское ПКТБ РЛ») филиала  
«Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт  
железнодорожного транспорта» («НИКТИ») АО «Укрзализниця».  
Ул. Вернадского, 1, кв. 400, г. Харьков, 61010, Украина.  
Тел.: +38 067 265 16 11.  
E-mail: zonov3450@gmail.com.

**Матяш Виктор Александрович,**

к.т.н..

Ул. Пушкинский възд, 6, кв1, г. Харьков,

61002, Украина.

Тел.: +38 067 530 90 45.

E-mail: pktbrl@meta.ua.

**Белоус Юрий Анатольевич,**

ведущий инженер локомотивного депо Дарница регионального филиала  
«Юго-Западная железная дорога» АО «Укрзалізниця».

Ул. Оросительная, 31, г. Киев,

03150, Украина.

Тел.: +38 044566 15 46.

**Польников Юрий Валентинович,**

начальник отдела нестандартного оборудования по ремонту локомотивов

СП «Полтавское ПКТБ РЛ» филиала «НИКТИ» АО «Укрзалізниця».

Ул. Деповская 2<sup>а</sup>, кв. 89-90, г. Харьков,

61009, Украина.

Тел.: +38 050 649 04 14.

E-mail: polnikov@ukr.net.

**Левцов Вячеслав Борисович,**

главный-технолог отдела нестандартного оборудования по ремонту локомотивов

СП «Полтавское ПКТБ РЛ» филиала «НИКТИ» АО «Укрзалізниця».

Ул. Деповская, д. 17, г. Харьков,

61080, Украина.

Тел.: +38 066 774 72 84.

E-mail: mega\_levcov@ukr.net.

## **РЕКЛАМА В ЖУРНАЛІ**

### **«ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ УКРАЇНИ»**

**З питань розміщення реклами в науково-практичному журналі**

**«Залізничний транспорт України»,**

який видається філією «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний  
інститут залізничного транспорту» АТ «Укрзалізниця»,

звертайтеся на ім'я директора філії, за адресою:

**03038, м. Київ, вул. І. Федорова, 39 або в редакцію журналу, за телефоном  
+38 (044) 309-68-93 чи на електронну пошту журналу ztu1520mm@gmail.com**

*Кандидати техн. наук Гайдено О. С.,  
Голуб Г. М., Кульбовський І. І.  
Інженер Штомпель Ю. М.*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АРХІТЕКТУР ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ПРОГНОЗУ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ЗАЛІЗНИЦЬ**

**Ключові слова:** прогнозування, нейронна мережа, Matlab, Neural Network Toolbox, залізниці, електроспоживання, NARX, Feed-forward.

### **Вступ**

В умовах ринку електричної енергії в Україні, господарства АТ «Укрзалізниця», як одного із найбільших промислових споживачів електроенергії в країні, потребують якомога більш точних засобів та методів прогнозування споживання електроенергії. Методам прогнозування показників електроспоживання завжди приділялася велика увага. У наш час найбільш передовими є методи, що базуються на технологіях штучного інтелекту, зокрема нейромережеве моделювання, яке знайшло широкого впровадження, завдяки високій точності та простоті його реалізації, порівняно з традиційними методами прогнозу.

Основною метою побудови прогностичної моделі за технологією штучних нейронних мереж (ШНМ) є забезпечення необхідної точності прогнозу, на яку впливають різні аспекти, такі як алгоритми навчання ШНМ, її архітектура та правильний підбір конфігурації, що вимагають індивідуального підходу до побудови мережі, через особливості самої технології та потребують подальшого дослідження. Алгоритмам навчання нейронних мереж для прогнозу електроспоживання на залізничному транспорті приділено увагу в попередній роботі авторів [1] та визначено алгоритм Байєсівської регуляризації, як найбільш підходящий для вирішення даного завдання і, з його використанням, було створено працездатну модель, що показала достатньо високі результати для практичного застосування, як частини інтелектуальної інформаційної системи керування електропостачанням залізниці [2]. Беручи за основу результати отриманні в роботі [1], як потенційний шлях підвищення точності ШНМ в даній роботі розглядаються можливості зміни її архітектури.

### **Мета**

Дослідити вплив архітектури штучної нейронної мережі на якість її навчання, з урахуванням збільшення величини ретроспективних даних для підвищення ефективності її використання на залізничному транспорті.

### **Основна частина**

Розглядаючи систему електропостачання залізниці як об'єкт моніторингу в роботі [3], зроблено висновок, що складність моделювання такої системи полягає у великій кількості факторів, що впливають на електроспоживання. Очевидно, що врахування їх усіх потребує величезної вибірки даних. За наявності достатньої кількості даних можна визначити вплив на електроспоживання кожного фактору окремо експериментальним шляхом. При цьому, додаючи в ШНМ новий фактор, слід перевіряти зміну похибки прогнозування – нерідко вона може зростати.

Результат прогнозування залежить у першу чергу від якості вхідних даних, тому при побудові прогностичної моделі обов'язково слід враховувати фактори, що матимуть найістотніший вплив на вихідні дані ШНМ [1], оскільки включення невідповідних входів або входів, що не впливають на цільові результати, може спотворити продуктивність прогнозу, збільшити час навчання, збільшити складність мережі [4].

Усі нетипові відхилення обсягів споживання електроенергії, як правило, спричиняються економічними та технологічними змінами, тому необхідно чітко усвідомлювати характер таких

змін та, якщо вони носять постійний характер (зміни тарифу, технологій, обсягів експлуатації), ШНМ слід перебудувати таким чином, щоб за основу завжди лягали постійні чинники [5].

На етапі навчання крім якості підбору ваг важливу роль відіграє його тривалість. Ці фактори, зазвичай, пов'язані зворотною залежністю, тому їх доводиться вибирати на основі компромісу. Якість навчання суттєво впливає на ефективність функціонування мережі в штатному режимі при вирішенні поставлених завдань [6].

Проходження процедури навчання ШНМ відбувається ітераціями. Помилка навчання визначається шляхом порівняння вихідних значень із цільовими значеннями після проходження через мережу всіх існуючих спостережень [7].

Для оцінки точності штучного нейронного підходу в прогнозуванні можуть бути використані різні критерії. Популярним критерієм якості навчання ШНМ є середньоквадратична помилка Mean Squared Error (MSE) – середнє значення квадрату різниці між результуючими та цільовими значеннями, визначити яку можна за формулою [4, 7]:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon^2}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{N}, \quad (1)$$

де:  $\varepsilon$  – помилка навчання;

$X_i$  та  $Y_i$  – значення очікуваного та фактичного виходів ШНМ; нижчі значення кращі; нуль означає відсутність помилки.

Якщо помилка навчання  $\varepsilon$  для всієї множини вхідних даних не виходить за встановлене обмеження, або досягнуто заздалегідь задану кількість ітерацій, процес навчання завершується. Величина MSE впродовж процесу навчання ШНМ, як правило, буде не більшою, ніж на попередніх ітераціях.

Алгоритм навчання поступово шукає глобальний мінімум, починаючи з випадково вибраної точки на поверхні функції помилок, та зупиняється в деякому мінімумі, який при вдалому навчанні буде глобальним, а може виявитися лише локальним, тобто модель працюватиме не для всіх даних [7]. У такому разі необхідна регуляризація, для якої можна використати формулу нормування вхідних даних, до яких виявився чутливим нейрон:

$$V_i' = \frac{V_i - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}}, \quad (2)$$

де:  $V_i$  та  $V_i'$  – ненормоване та нормоване значення, що подаються на  $i^{\text{th}}$  вхід;

$V_{\min}$  і  $V_{\max}$  – мінімальне та максимальне значення вхідних даних даної вибірки.

Складність регуляризації у тому, що важко знайти оптимальний параметр регуляризації та кількість необхідних нейронів, тому на основі правила Байєса було запропоновано Д. Мак-Кейєм автоматичний вибір параметра регуляризації [8]. Детально процедури регуляризації з використанням правила Байєса описано у роботі [9].

Розглянемо програмне рішення Neural Network Toolbox Matlab як інструмент прогнозування на основі ШНМ. Neural Network Toolbox дає достатні можливості для моделювання ШНМ із використанням популярних алгоритмів при відносно простій реалізації, що в свою чергу дозволяє швидко протестувати доступні алгоритми й обрати кращий для конкретної задачі. В програмі доступні вибір архітектури ШНМ залежно від завдання, налаштування кількості нейронів і прихованих шарів, що дає змогу експериментальним шляхом швидко оцінити різні конфігурації, які впливають на здатність ШНМ до навчання і змінюються залежно від складності поставленої мети. Хоча немає жорсткого набору правил для визначення оптимальної конфігурації ШНМ, основним правилом є вибір мінімальної кількості нейронів, достатньої для того, щоб виконати завдання, але не надто багато, щоб навчання не призвело до локального рішення.

По суті алгоритми навчання нейронних мереж аналогічні алгоритмам пошуку глобального екстремуму функцій багатьох змінних [7, 10]. У додатку Neural Network Toolbox для Matlab такими є алгоритми спряжених градієнтів [11] і Левенберга – Марквардта (Levenberg – Marquardt)



[12]. Вони зупиняються під час збільшення середньої квадратичної помилки тестових зразків. Алгоритм Байєсівської регуляризації (Bayesian regularization) зупиняється відповідно до мінімізації адаптаційної ваги (регуляризації). Алгоритм Байєсівської регуляризації має найкращу продуктивність у роботі [1], тому всі подальші дослідження проведено з його використанням, при цьому за критерій якості навченої ШНМ взято MSE.

Точність прогнозування обсягу споживання електроенергії залізницями у значній мірі залежить від величини вибірки ретроспективних даних, величина якої з часу публікації [1] поповнилася даними за 2018 – 2019 роки.

Для дослідження ефективності різних архітектур ШНМ її створено у наступній конфігурації – вхідний шар, який складається з нейронів, кількість яких відповідає сумарній кількості ретроспективних даних: погодинної температури повітря на залізничній ділянці, трьох типів рухомого складу, що рухаються електрифікованою ділянкою за установленим графіком, не тягове навантаження; вихідний шар, який містить нейрони, що характеризують погодинне споживання електроенергії в межах електрифікованої ділянки.

На початковій стадії експерименту використано (Feed-forward) архітектуру прямого розповсюдження даних і зворотного розповсюдження помилок (рис. 1), яка за описами Neural Network Toolbox найбільш підходяща для прогнозування електроспоживання.

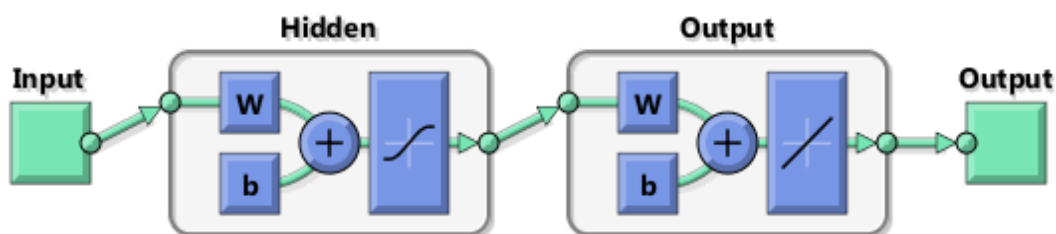


Рис. 1 – Схема двохшарової (Feed-forward) архітектури нейронної мережі прямого розповсюдження даних і зворотного розповсюдження помилок

При такій архітектурі ШНМ для її навчання необхідно вказати цільові значення часового ряду, які є еталоном при складанні прогнозування, та вхідні дані, що підлягають обробці. Після навчання ШНМ підбирає вагові коефіцієнти таким чином, щоб середнє квадратичне відхилення вихідних значень від етальонних було мінімальним. До переваг такої архітектури відносять швидкість її роботи, що підтвердилося зафіксованою на 272 ітерації навчання середньоквадратичною помилкою  $MSE = 0,0021625$ . Це найкращий результат, якого вдалося досягти побудувавши ШНМ архітектури Feed-forward в описаній вище конфігурації.

Під час експерименту ШНМ показала достатньо хороші результати прогнозу, проте щоразу дещо різні при кожному з її запусків. Дійсно, до недоліків такої мережі відносять неможливість використання для повторного навчання вагових коефіцієнтів, отриманих при початковому навчанні, що призводить до різноманітних рішень при одному і тому ж наборі даних та не сприяє збільшенню точності, так як ШНМ щоразу навчається спочатку. Враховуючи цей недолік, було проведено дослід на іншій архітектурі прогнозування часових рядів, що представляє собою модель нелінійної авторегресії із зовнішніми входами (NARX) (рис. 2).

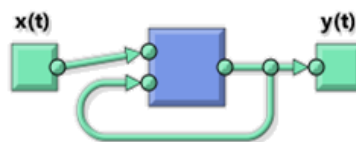


Рис. 2 – Узагальнена схема нейронної мережі архітектури NARX

Використання архітектури NARX потребує задавати для ШНМ як вхідні значення функції, так і цільові. Дані на вході, проходячи через мережу, обробляються відповідно до вагових коефіцієнтів, а потім знову попадають на вхід мережі, тим самим замінюючи себе зворотним розповсюдженням помилок, що дає можливість застосування вагових коефіцієнтів, отриманих

після першого навчання, при повторному навчанні ШНМ та в свою чергу підвищує точність її роботи.

Вибір кількості прихованих шарів ШНМ і елементів у них здійснено експериментально так, щоб для різних вхідних і вихідних наборів даних досягалася мінімальна похибка прогнозування, завдяки чому вдалося досягти найменшого значення MSE 0,0020052 на 531 ітерації (рис. 3).

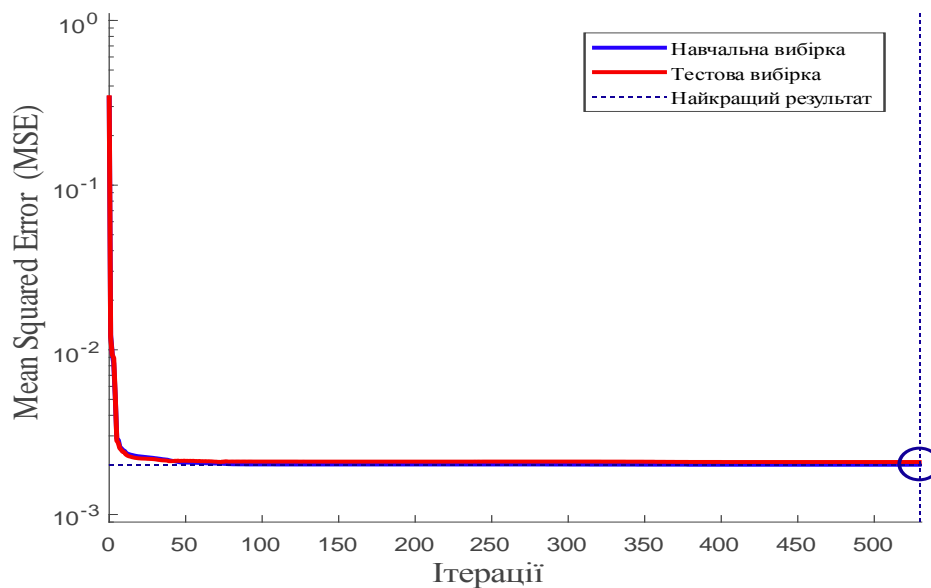


Рис. 3 – Графік зміни середньоквадратичної помилки в залежності від ітерацій навчання ШНМ архітектури NARX за алгоритмом Байєсівської регуляризації

Емпіричним шляхом встановлено суттєву залежність поведінки моделі конфігурації NARX від кількості нейронів у вхідному шарі. Визначення цих архітектурних елементів оптимальним чином є критично важливим і складним завданням.

У результаті дослідження архітектур Feed-forward та NARX, краще значення MSE отримано для ШНМ архітектури NARX, яке дорівнює 0,0020052, що на 7,27% перевершує результат ( $MSE = 0,0021625$ ), отриманий для архітектури Feed-forward. Варто відмітити, що ШНМ, побудована на архітектурі Feed-forward завершила роботу за майже вдвічі меншу кількість ітерацій (272 проти 531), що може бути корисним при нестачі обчислювальної потужності, проте неспівставно з 7% різницею в точності прогнозу, що разом із здатністю мережі до повторного навчання робить архітектуру NARX більш перспективним інструментом прогнозу електроспоживання залізницями в умовах широкого застосування автоматизованих систем комерційного обліку електричної енергії в АТ «Укрзалізниця».

### Висновки

Архітектури нейронних мереж Feed-forward та NARX хоч і показали схожі результати, та на практиці для прогнозу електроспоживання залізниці продуктивнішою виявилася архітектура NARX, тому що побудована на ній штучна нейронна мережа, завдяки особливостям вибраної архітектури, краще реагує на збільшення вибірки даних та має більше перспектив практичного застосування, за умов подальшого збору даних для її навчання.

### Література

1. Гайденко О. С. Прогнозування спожитої електроенергії методами нейромережевого моделювання / О. С. Гайденко, Г. М. Голуб // Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Серія «Транспортні системи і технології». – 2018. – Вип. 31. – С. 196-201.
2. Гайденко О. С. Модель інтелектуальної інформаційної системи керування електропостачанням залізниці / О. С. Гайденко, Г. М. Голуб // Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Серія «Транспортні системи і технології». – 2018. – Вип. 32, т. 2. – С. 96-101. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2018-32-2-96-101>

3. Гайденко О. С. Характерні особливості моделювання системи та процесів тягового електропостачання залізниці як об'єкта моніторингу та керування / О. С. Гайденко, Г. М. Голуб // Моделювання та інформаційні технології. – 2017. – Вип. 79. – С. 42-48.
4. Mishra D. K. Efficient algorithms for load forecasting in electric power system using artificial neural network / D. K. Mishra, A. K. D. Dwivedi, S. P. Tripathi // International Journal of Latest Research in Science and Technology. – 2012. – Vol. 1, iss. 3. – P. 254-258.
5. Лутчин Т. М. Ідентифікація параметрів режимів електроспоживання: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.01 / Тетяна Миколаївна Лутчин; Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – Київ, 2015. – 204 с.
6. Макаров И. М. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И. М. Макаров, В. М. Лохин, С. В. Манько; отв. ред. И.М. Макаров; Отделение информ. технологий и вычислит. систем РАН. – Москва: Наука, 2006. – 333 с.
7. Медведев В. С. Нейронные сети. MATLAB 6 / В. С. Медведев, В. Г. Потемкин; под общ. ред. В. Г. Потемкина. – Пакеты прикладных программ; Кн. 6. – Москва: ДИАЛОГ-МИФИ, 2001. – 630 с.
8. MacKay D. J. C. Bayesian interpolation / D. J. C. MacKay // Neural Computation. – 1991. – Vol. 4. – P. 415-447.
9. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – Москва: Транспорт, 1982. – 528 с.
10. Міхнева Г. П. Інформаційна технологія обробки інформації в інтелектуальній системі керування координатно-вимірною машиною / Г. П. Міхнева // Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій. – 2011. – Т. 15. – С. 130–141.
11. Fletcher R. Function minimization by conjugate gradients / R. Fletcher, C. M. Reeves // Computer Journal. – 1964. – Vol. 7, iss. 2. – P. 149-154. <https://doi.org/10.1093/comjnl/7.2.149>
12. Hagan M. T. Training feedforward networks with the Marquardt algorithm / M. T. Hagan, M. Menhaj // IEEE Transactions on Neural Networks. – 1994. – Vol. 5, iss. 6. – P. 989–993. DOI: 10.1109/72.329697

#### **ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ**

**Гайденко Олександр Сергійович,**

к.т.н., провідний інженер відділу контролю технічного стану пасажирських вагонів  
Управління контролю технічного стану Науково-впроваджувального центру  
філії «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут залізничного  
транспорту» АТ «Укрзалізниця».  
Вул. І. Федорова, 39, м. Київ, 03038, Україна.  
Тел.: +38 096 493 54 13.  
E-mail: haidenko1520mm@gmail.com.

**Голуб Галина Михайлівна,**

к.т.н., доцент кафедри «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
транспорту» (АКІТТ) Київського інституту залізничного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій (ДУІТ).  
Вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна.  
Тел.: +38 063 266 18 98.  
E-mail: golub.galina@ukr.net.

**Кульбовський Іван Іванович,**

к.т.н., доцент, доцент кафедри «АКІТТ» Київського інституту залізничного  
транспорту ДУІТ.  
Вул. І. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна  
Тел.: +38 067 930 59 28.  
E-mail: kulbovskiy@ukr.net.

**Штомпель Юлія Миколаївна,**  
викладач Київського електромеханічного фахового коледжу.  
Повітрофлотський проспект, 35, м. Київ, 03037, Україна.  
Тел.: +38 097 689 00 53.  
E-mail: uliastompel@gmail.com.

## Кваліфікаційно-атестаційний центр зварників

### АТЕСТАЦІЙНИЙ ЦЕНТР ЗВАРНИКІВ



### АТЕСТАЦІЯ ЗВАРНИКІВ

#### Кваліфікаційно-атестаційний центр зварників (далі – КАЦЗ)

філії «Експертно-технічний центр» АТ «Укрзалізниця» (далі – філія «ЕТЦ») проводить атестацію зварників на право виконання зварювальних та наплавлювальних робіт при виготовленні, ремонті та модернізаціях металоконструкцій, обладнання, вузлів та деталей залізничного рухомого складу, в тому числі спеціального, для потреб залізничного транспорту згідно з нормативними документами, які затвердженні наказом Міністерства транспорту та зв'язку України від 05.08.2009 № 834:

- СОУ 35.2-00017584-030-1:2009 «Правила атестації зварників на залізничному транспорті. Зварювання та наплавлення.

Частина 1. Сталі»;

- СОУ 35.2-00017584-030-2:2009 «Правила атестації зварників на залізничному транспорті. Зварювання та наплавлення. Частина 2. Чавуни»;

- НПАОП 0.00-1.16-96 «Правила атестації зварників», Держнаглядохоронпраця.

Атестація зварників може проводитись як на базах атестаційного центру зварників філії «ЕТЦ» (м. Київ, м. Запоріжжя) так і на території Замовника, при наявності у нього відповідного матеріально-технічного забезпечення (навчальний клас, зварювальне обладнання та інше - визначається при проведенні аудиту), що дозволяє проводити атестацію зварників з частковим відривом їх від виробництва, та заощадити кошти на відрядження.

При навчанні зварників враховується специфіка зварювальних та наплавлювальних робіт

Надання послуг організаціям та структурним підрозділам, які входять до складу АТ «Укрзалізниця», здійснюється на підставі укладеного Внутрішнього зобов'язання, з розрахунком по авізо. Для всіх інших підприємств послуги надаються на підставі укладених Договорів з філією «ЕТЦ». Для початку робіт філією «ЕТЦ» з атестації зварників Замовникам необхідно надати в електронному вигляді або поштовим відправленням Заяву та Лист на атестацію зварників на адресу:

м. Київ, вул. Архітектора Кобелева 3/8 філія «ЕТЦ» АТ «Укрзалізниця».

Тел. (044) 309-76-20 (5-76-20).

Lotus: Рудаков О.М. ЕТЦ/ЕТЦ/УЗ/UKRZAL

Web: [https://www.uz.gov.ua/about/general\\_information/entertainments/etc/](https://www.uz.gov.ua/about/general_information/entertainments/etc/)

#### КОНТАКТИ:

**Начальник КАЦЗ філії ЕТЦ Серняєв Олексій Георгійович**

E-mail: [sernyaev1520mm@gmail.com](mailto:sernyaev1520mm@gmail.com)

**З організаційних питань звертатися:**

Гурський Юрій Олександрович,  
моб. тел. +38 063 452 60 93.  
E-mail: [hurskyi1520mm@gmail.com](mailto:hurskyi1520mm@gmail.com)  
Lotus Notus: Гурський Ю.О.  
ЕТЦ\_КАЦЗ/ЕТЦ/DNEPR/UKRZAL

Баршак Роман Миколайович,  
моб. тел. +38 063 452 61 96.  
E-mail: [barshak1520mm@gmail.com](mailto:barshak1520mm@gmail.com)  
Lotus Notus: Баршак Р.М.  
ЕТЦ\_КАЦЗ/ЕТЦ/DNEPR/UKRZAL

**З питань оформлення Договорів, Внутрішніх зобов'язань, актів здавання-приймання послуг звертатися:**

Булат Олена Вікторівна, моб. тел. +38 063 948 74 57.

E-mail: [bulat1520mm@gmail.com](mailto:bulat1520mm@gmail.com)

Lotus Notus: Булат О.В. ЕТЦ\_КАЦЗ/ЕТЦ/DNEPR/UKRZAL

*Д-р техн. наук Мямлин С. В.*

**ИШТВАН ЗОБОРИ – УЧЕНЫЙ И ОРГАНИЗАТОР НАУКИ**

**ISTVAN ZOBORI - SCIENTIST AND ORGANIZER OF SCIENCE**

**Ключевые слова:** доктор технических наук Зобори Иштван, ученый-механик, железные дороги, продольная динамика поезда, динамика подвижного состава, взаимодействие подвижного состава и пути



В начале этого года ушел из жизни выдающийся ученый-механик и организатор международных научных конференций в области железнодорожного транспорта, почетный профессор Будапештского университета технологий и экономики, член международной редакционной коллегии научно-практического журнала «Железнодорожный транспорт Украины», доктор технических наук, профессор Иштван Зобори.

Начав свою трудовую деятельность в Будапештском университете технологий и экономики в 1976 году, Иштван Зобори до конца сохранял верность традициям университетской науки. В 1981 году защитил диссертацию кандидата технических наук, а в 1993 году защитил диссертацию доктора технических наук. За время работы в университете прошел путь от преподавателя кафедры до заведующего кафедрой и декана факультета. За свою историю кафедра и факультет несколько раз меняли название, но всегда были

связаны с железнодорожным транспортом и инженерией.

Основные научные интересы профессора Иштвана Зобори были связаны с железнодорожным транспортом, а именно: стохастическое динамическое моделирование, продольная динамика поездов, усталость и надежность транспортных конструкций, анализ причин аварий подвижного состава, динамика и безопасность движения рельсовых экипажей, измерение параметров железнодорожного пути, взаимодействие подвижного состава железных дорог и пути, износ колес и рельсов, создание новых конструкций тележек и вагонов.

Профессор Иштван Зобори автор более 200 научных публикаций в национальных и международных изданиях, основные из них приведены в пристатейной библиографии, а некоторые научные публикации ученых из Украины на конференциях, которые организовывал и проводил профессор Иштван Зобори, приведены в литературе к статье [1-12]. Он также руководил подготовкой 15 кандидатов и докторов технических наук. Фотографии с конференций, с участием профессора Иштвана Зобори, представлены далее (из личного архива автора и с веб-сайта Будапештского университета технологий и экономики). На фотографиях, вместе с профессором Зобори, участники этих конференций профессор Отмар Креттек, Германия, и профессор Сергей Мямлин, Украина.

Наше первое знакомство с профессором Иштваном Зобори состоялось в ноябре 1994 года, когда делегация Днепропетровского государственного технического университета железнодорожного транспорта (ДИИТа, теперь – Днепропетровского университета науки технологий) в составе: профессора Каблукова В.А. (ректора университета), профессора Блохина Е.П. (первого проректора университета), профессора Дановича В.Д. (профессора кафедры Строительной механики), старшего научного сотрудника Мямлина С.В. (заведующего Отраслевой научно-исследовательской лаборатории динамики и прочности подвижного состава – ОНИЛ ДППС ДИИТа), научного сотрудника Литвина В.А. (ОНИЛ ДППС ДИИТа) была приглашена с научными



докладами на конференцию по безопасности движения в Будапештский университет технологий и экономики. Для меня, тогда молодого ученого, это была первая поездка за границу и первое участие в международной научной конференции. Безусловно, мы все серьезно готовились, чтобы показать иностранным коллегам результаты наших исследований – Научной школы транспортной механики, которую создал академик Академии наук Украины Всеволод Арутюнович Лазарян. Наши доклады были посвящены вопросам динамики рельсовых экипажей, особенностям расследования случаев схода вагонов с рельсов, продольной динамике поездов, пространственной динамике рельсовых экипажей и вопросам создания тренажеров машинистов локомотивов для



обучения безопасным и энергосберегающим приёмам вождения поездов. Не обошлось без курьезов, планировалось, что Литвин В.А. будет озвучивать все доклады как специалист, прошедший стажировку в Дельфтском университете и хорошо владеющий английским языком, но перед самым выступлением он простудился и потерял голос, поэтому все доклады пришлось делать мне. Это была серьезная проверка. Но, благодаря профессионализму и опыту профессора Иштвана Зобори, наши доклады и ответы

на вопросы участников конференции прошли достаточно гладко и хорошо. Затем, представители нашего университета и других научных организаций Украины много раз бывали на различных научных форумах [1-12], которые организовывал на базе Будапештского университета технологий и экономики и был президентом этих конференций мирового уровня профессор Иштван Зобори (International Conference on Railway Bogies and Running Gears – BOGIE. Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies - VSDIA. Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail / Wheel Systems). На протяжении около 15 лет мне посчастливилось быть и членом научных комитетов некоторых этих международных конференций, например, Симпозиума по железнодорожным тележкам и ходовым частям (International Conference on Railway Bogies and Running Gears – BOGIE). Материалы конференций индексируются в международных наукометрических базах данных *Scopus* и *Web of Science*. Профессор Иштван Зобори много лет сотрудничал и с нашим отраслевым научно-практическим журналом «Железнодорожный транспорт Украины» в качестве члена международной редакционной коллегии.

Профессора Иштвана Зобори всегда отличали высокий профессионализм, порядочность, интеллигентность и человечность в отношениях со своими коллегами, преподавателями и студентами.

#### **Библиография профессора Иштвана Зобори.**

Zobory I., Békefi E. On real-time simulation of the longitudinal dynamics of trains on a specified railway line // *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*. 1995. Vol. 23 (1-2). P. 3-17.

Zobory I. Prediction of Wheel/Rail Profile Wear // *Vehicle System Dynamics*. 1997. Vol. 28, Iss. 2-3. P. 221-259. DOI 10.1080/00423119708969355

Zobory I. On stochastic field model of the wheel/rail rolling/sliding contact force transfer // *Proceedings of the 10th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification, and Anomalies*

VSDIA 2006 (2006, Budapest, Hungary). Budapest: Budapest University of Technology and Economics, 2008. P. 95-116.

Zobory I. Irregular Brake Disc Wear Caused by Dynamically Unstable Running // Proceedings of the 15th Mini Conference on vehicle system dynamics, identification and anomalies (Budapest, Hungary, 7-9 November, 2016). Budapest: Budapest University of Technology and Economics, 2017. P. 55-64.

Zobory I., Nagy D. Dynamical Analysis of a Special Anti-Skid-System for Railway Cars and Traction Units // Proceedings of the 15th Mini Conference on vehicle system dynamics, identification and anomalies (Budapest, Hungary, 7-9 November, 2016). Budapest: Budapest University of Technology and Economics, 2017. P. 149-162.

Sábitz L., Zobory I. Sliding Friction Coefficient and Wear Multiplier as Functions of the Tribological State-Vector // Proceedings of the 15th Mini Conference on vehicle system dynamics, identification and anomalies (Budapest, Hungary, 7-9 November, 2016). Budapest: Budapest University of Technology and Economics, 2017. P. 311-320.

Sábitz L., Zobory I. Finite element modelling of the thermo-elastic processes in tread-braked wheels // Proceedings of the 8th International Conference on Railway Bogies and Running Gears - BOGIE '10. Budapest: BME, Department of Railway Vehicles and Vehicle System Analysis, 2010, P.103-113.

Sábitz L., Zobory I. Simulation of local heat processes on the tread of a blockbraked railway wheel // Proceedings of the 13th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies - VSDIA 2012. Budapest: BME, Department of Railway Vehicles and Vehicle System Analysis, 2014. P. 245-252.

Sábitz L., Zobory I. On Simulating the Thermal Conditions of Martensite Formation on Railway Wheel Treads // Proceedings of the Second International Conference on Railway Technology. Civil-Comp Press, paper 105. DOI: 10.4203/ccp.104.105

Sábitz L., Zobory I. Combined Thermal and Stress Finite Element Analysis of Tread-Braked Wheels // Proceedings of the 12th MINI Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies - VSDIA 2010. Budapest: BME, Department of Railway Vehicles and Vehicle System Analysis, 2011. P. 203-213.

Szőke D., Zobory I. Dynamical Characteristics of Crank Mechanisms // Proceedings of the 15th Mini Conference on vehicle system dynamics, identification and anomalies (Budapest, Hungary, 7-9 November, 2016). Budapest: Budapest University of Technology and Economics, 2017. P. 321-330.

Zobory I. Vehicle Dynamics. Lecture notes. Budapest: BME, Department of Railway Vehicles, 1999.

Zobory I., Győri J., Kolonits F., Békefi E. On Reliability Analysis of Bogies and Running Gears // Proceedings of the 7th International Conference on Railway Bogies and Running Gears. Budapest: BME Department of Railway Vehicles, 2007. P. 367-383.

Szabó A., Zobory I. On Deterministic and Stochastic Simulation of Wheel and Rail Profile Wear Process // Periodica Polytechnica - Transportation Engineering. 1998. Vol. 26 (1-2). P. 3-17.

Zoller V., Zobory I. On dynamics of the track/vehicle system in presence of inhomogeneous rail supporting parameters // Periodica Polytechnica - Transportation Engineering. 2011. Vol.39 (2). P. 83-85.

Zoller V., Zobory I. Railway track dynamics with periodically varying stiffness and damping in the Winkler foundation // Periodica Polytechnica - Transportation Engineering. 2011. Vol. 39 (2). P. 87-90.

Zobory I., Békefi E. Control Strategies of Brake Dynamics for Railway Vehicles Equipped with Anti-Slip-Device // Proceedings of the 9th MINI Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies (VSDIA 2004). Budapest: BME, 2004. P. 227-236.

Zobory I., Zoller V., Zibolen E. Theoretical investigations into the dynamical properties of railway tracks using a continuous beam model on elastic foundation // Periodica Polytechnica, Ser. Transp. Eng. 1994. Vol. 22, No.1. P. 35-54.

Zoller V., Zobory I. Relations between the motion-responses caused by fixed and moving loads acting on discretely supported strings and beams // Progress in Industrial Mathematics at ECMI 2000, Mathematics in Industry 1. Berlin: Springer, 2002. P. 657-661.

### ***Литература***

1. Influence of railway vehicle models of detail on the results of wheel wear prediction / S. Myamlin,

E. Blokhin, V. Danovich, V. Litvin // Proceedings of the 2nd Mini Conference on "Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems". – Budapest, 1994.

2. Automational complex for studying train movement as a system and its utilization for drivers training in safe and economic method of movement / E. Blokhin, G. Evdomakha, K. Zheleznov, S. Myamlin // Proceedings of the 1996 5th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies, Budapest, Hung., 11–13 Nov. 1996. – Budapest, 1996. – P. 251–253.

3. Influence of railway vehicles models degree of detail on the results of wheel wear prediction [Text] / Eugeney P. Blokhin, Victor D. Danovich, Sergey V. Myamlin, Vladislav A. Litwin // Proceedings of the 2nd Mini Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail / Wheel Systems, Budapest, 29–31 July 1996 / Techn. Univ. of Budapest. – Budapest, 1996. – P. 297–303.

4. Myamlin S. Mathematical modelling of body connections in railway vehicles // 6th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies, 9–11 November 1998, Budapest, Hungary / Budapest Faculty of Transportation Engineering – [Budapest], 1998.

5. Pshin'ko O. M. Effect of the lengths of rail line horizontal and vertical irregularities on dynamic loading of open wagon / O. M. Pshin'ko, Y. P. Blokhin, S. V. Myamlin // Abstracts of the 7th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies / Budapest Univ. of Technology and Econ. – [Budapest], 2000. – P. 14.

6. Pshin'ko A. The influence of the length of horizontal and vertical irregularities of railway track on dynamic loading of an open wagon / Aleksandr Pshin'ko, Evgeniy Blokhin, Sergiy Myamlin // Proceedings of the 7th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies / Budapest Univ. of Technology and Econ. – Budapest, 2000. – P. 247–254.

7. Blokhin Ye. P. Optimization of parameters of spring suspension of the freight car three-piece bogie / Yevgeniy P. Blokhin, Oleksandr M. Pshin'ko, Sergiy V. Myamlin // Abstracts 5th International Conference on Railway Bogies and Running Gears. – Budapest, 2001. – P. 84–86.

8. Blokhin Ye. P. Optimization of parameters of spring suspension of the freight car three-piece bogie / Y. P. Blokhin, O. M. Pshin'ko, S. V. Myamlin // Proceedings 5th International Conference on Railway Bogies and Running Gears. – Budapest, 2001. – P. 263–271.

9. Blokhin Y. P. Peculiarities of dynamics of empty freight wagon] / Y. P. Blokhin, O. M. Pshin'ko, S. V. Myamlin // Proceedings of the 8th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies, 11–13 November 2002, Budapest, Hungary / Budapest Univ. of Technology and Econ. – Budapest, 2002. – P. 167–174.

10. Pshin'ko O. Modernization of three-piece bogies [Text] / Olexandr Pshin'ko, Sergiy Myamlin, Andriy Yalovoy, Victor Rasporskiy // Proceedings 6th International Conference on Railway Bogies and Running Gears, Budapest, 13–16 September, 2004. – Budapest, 2004. – P. 175–180.

11. On measuring vertical forces in freight car bogies / O. Pshin'ko, L. Manashkin, S. Myamlin, B. Bodnar, Y. Pys'mennyy // 9th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies, Budapest, 8–10 November, 2004 : abstracts / Budapest Univ. of Technology and Econ. – Budapest. – 2004. – P. 11–12.

12. On measuring vertical forces in freight car bogies / Olexandr Pshin'ko, Lev Manashkin, Sergiy Myamlin, Borys Bodnar, Yevgen Pys'mennyy // Proceedings 9th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies, Budapest, 8–10 Nov, 2004 / Budapest Univ. of Technology and Econ. – Budapest. – 2004. – P. 195–200.

#### **СВЕДЕНИЯ О АВТОРЕ**

**Мямлин Сергей Витальевич,**

д.т.н., профессор, директор филиала

«Центр диагностики железнодорожной инфраструктуры»

АО «Украинские железные дороги».

Ул. Святошинская, 13, г. Киев, 03115, Украина.

Тел.: +38 044 309 74 00.

E-mail: sergeymyamlin@gmail.com.

ORCID: 0000-0002-7383-9304

## НОВИНИ СТАНДАРТИЗАЦІЇ

Відповідно до пункту 2 частини другої статті 11 Закону України «Про стандартизацію», розпорядження Кабінету Міністрів України від 26.11.2014 № 1163 «Про визначення державного підприємства, яке виконує функції національного органу стандартизації» Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ») своїм наказом від 10 грудня 2021 р. № 494 відновив дію на період з 01 січня 2022 року до 01 січня 2023 року національних стандартів:

**ДСТУ EN ISO/IEC 17020:2014. Оцінка відповідності. Вимоги до роботи різних типів органів з інспектування (EN ISO/IEC 17020:2012, IDT);**

**ДСТУ ISO/IEC 17025:2017. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (ISO/IEC 17025:2017, IDT);**

**ДСТУ EN ISO/IEC 17065:2014. Оцінка відповідності. Вимоги до органів з сертифікації продукції, процесів та послуг (EN ISO/IEC 17065:2012, IDT).**

Наказом ДП «УкрНДНЦ» від 15 грудня 2021 р. № 504 гармонізовані з європейськими та міжнародними стандартами, методом перекладу, з наданням чинності з 01 серпня 2022 року національні стандарти:

**ДСТУ ISO 10015:2021. Управління якістю. Настанови щодо управління компетентністю та щодо розвитку персоналу (ISO 10015:2019, IDT) - на заміну ДСТУ ISO 10015:2008;**

**ДСТУ ISO 10018:2021. Управління якістю. Настанови щодо залучення персоналу (ISO 10018:2020, IDT) - на заміну ДСТУ ISO 10018:2015.**

Скасовано чинність з 01 серпня 2022 року національних стандартів:

**ДСТУ ISO 10015:2008. Управління якістю. Настанови щодо навчання персоналу (ISO 10015:1999, IDT);**

**ДСТУ ISO 10018:2015. Управління якістю. Настанови щодо залучення персоналу та щодо його компетентності (ISO 10018:2012, IDT).**

Наказом ДП «УкрНДНЦ» від 21 грудня 2021 р. № 523 прийнято національний стандарт, гармонізований з європейськими стандартами, методом перекладу, з наданням чинності з 01 вересня 2022 року:

**ДСТУ EN ISO/IEC 17000:2021. Оцінювання відповідності. Словник термінів і загальні принципи (EN ISO/IEC 17000:2020, IDT; ISO/IEC 17000:2020, IDT) - на заміну ДСТУ ISO/IEC 17000:2007.**

Скасовано чинність з 01 вересня 2022 року національного стандарту:

**ДСТУ ISO/IEC 17000:2007. Оцінювання відповідності. Словник термінів і загальні принципи.**

Наказом ДП «УкрНДНЦ» від 21 грудня 2021 р. № 526 прийнято національний стандарт, гармонізований з європейськими та міжнародними стандартами, методом перекладу, зі збереженням року першого прийняття цих європейських та міжнародних стандартів як національних методом підтвердження, з наданням чинності з 01 вересня 2022 року:

**ДСТУ EN ISO/IEC 17067:2014. Оцінювання відповідності. Основні положення сертифікації продукції та керівні вказівки щодо схем сертифікації продукції (EN ISO/IEC 17067:2013, IDT; ISO/IEC 17067:2013, IDT).**

Наказом ДП «УкрНДНЦ» від 24 грудня 2021 р. № 546 прийнято зміну до національного стандарту, з наданням чинності з 15 лютого 2022 року:

**Зміна № 2 ДСТУ 4344:2004. Рейки звичайні для залізниць широкої колії. Загальні технічні умови.**

*Татур О. К. - головний фахівець  
відділу технічного регулювання  
і метрологічного забезпечення  
Департаменту розвитку і технічної  
політики АТ «Укрзалізниця»*

## РЕФЕРАТИ

УДК 629.4.027.5

DOI: 10.34029/2311-4061-2022-142-1-04-13

**Оцінка ресурсу несучих конструкцій вагонів метрополітену моделей 81-717 та 81-714 після тривалої експлуатації / Путятю А.В. // Залізничний транспорт України. – 2022. – № 1. – С. 4-13.**

Наведено результати обстеження технічного стану головного і проміжного вагонів метрополітену після тривалої експлуатації. Виконана серія розрахунків на міцність методом кінцевих елементів їх металоконструкцій з урахуванням фактичного і прогнозного технічного стану основних несучих елементів. Наведено результати експериментальних досліджень напруженого стану напруженого стану кузовів вагонів метрополітену. Отримано масиви динамічних напруг у конструктивних елементах кузовів вагонів при різних режимах експлуатації. Отриманий масив експериментальних даних використаний для оцінки залишкового ресурсу несучих конструкцій вагонів метрополітену після тривалої експлуатації.

**Ключові слова:** вагони метрополітену, конструкція, що несе, тривала експлуатація, міцність, метод кінцевих елементів, випробування, тензометрування, напруги, залишковий ресурс.

УДК 625.143.5

DOI: 10/34029/2311-4061-2022-142-1-14-19

**Впровадження нових конструкцій пружних рейкових скріплень на залізницях України / Демченко С.М., Татуревич А.А., Макаров Ю.О. // Залізничний транспорт України. – 2022. – № 1. – С. 14-19**

У статті наведено інформацію щодо результатів експлуатаційних випробувань рейкових пружних скріплень типу Vossloh System W-30 компанії «Фосло Фастейнинг Системс ГмбХ» та SBS W SL-1-900-R65 компанії «SCHWING AG», які добре зарекомендували себе на залізницях багатьох країн світу. Скріплення Vossloh та SBS надійні та легкі в обслуговуванні, що забезпечує постійну підтримку заданих параметрів колії. Для визначення технічних характеристик скріплень в умовах експлуатації на залізницях України було вкладено ділянки колії з дослідними скріпленнями у регіональній філії «Одеська залізниця». Експлуатаційні випробування обох типів скріплень виконувалися з метою визначення відповідності параметрів скріплень реальним умовам експлуатації на головних коліях АТ «Укрзалізниця», а також прийняття рішення щодо впровадження скріплень в постійну експлуатацію.

**Ключові слова:** залізниця, колія, скріплення, клема пружна, прокладка підрейкова,

*кутонаправляюча плита, боковий упор, шуруп колійний, дюбель пластмасовий.*

УДК 621.436:629.128.6

DOI: 10.34029/2311-4061-2022-142-1-20-25

**Діагностика робочого процесу двотактних двигунів MAN B&W / Варбанець Р.А., Мальчевський В.П., Кучеренко Ю.М., Мінчев Д.С., Кирица В.І., Бондаренко В.В. // Залізничний транспорт України. – 2022. – № 1. – С. 20-25.**

Використання двигунів із двотактним принципом дії на тепловозах в АТ «Укрзалізниця» стимулює розвиток сучасних методів контролю їхнього робочого процесу. Насамперед йдеться про неруйнівні методи контролю в умовах скороченого часу під час реостатних випробувань.

Досвід діагностики робочого процесу морських та стаціонарних двотактних двигунів, широко поширених на морському флоті, безсумнівно буде корисним і може бути з успіхом застосовано на тепловозних двигунах, оскільки багато завдань і проблем експлуатації двигунів на транспортних засобах є спільними для морських і тепловозних двигунів. Насамперед це робота на нестаціонарних режимах, для яких актуальне застосування аналітичних методів синхронізації даних в альтернативу апаратним методам, а також методів вібродіагностики.

Зміна температури палива також впливає на робочий процес. Ряд параметрів робочого процесу таких, як якість сумішоутворення, затримка самозаймання та характеристики згоряння в циліндрах, залежать від стабільної роботи системи паливopідготовки та насамперед від роботи системи стабілізації температури на вході в паливні насоси високого тиску.

Застосування сучасних методів синхронізації даних та вібродіагностики розширює можливості діагностики морських двигунів. Використовуючи існуючі методи, неможливо здійснювати під час експлуатації прямі вимірювання тиску впорскування палива, фаз подачі та газорозподілу двигунів за допомогою переносних діагностичних систем. Альтернативою прямим вимірюванням є аналіз вібродіаграм за допомогою якого можна визначити фази підйому та посадки голки форсунки, початку подачі та відсікання палива паливним насосом високого тиску, початок та кінець циркуляції підігрітого важкого палива в паливній системі, а також фази закриття та, у деяких випадках, відкриття клапанів газорозподілу, та контроль температури палива.

У статті наведено результати діагностики двотактних дизелів електростанції Mahon, що знаходиться на острові Менорка (Іспанія). У цих двигунів були виявлені несправності форсунки та

випускного клапана. Для моделювання робочого процесу з урахуванням експлуатаційних факторів використано ресурс Blitz-PRO.

**Ключові слова:** дизелі, робочий процес, моделювання, діагностика, паливна апаратура, клапани газорозподілу.

УДК 629.424.3:[621.434:004.416.6]

DOI: 10.34029/2311-4061-2022-142-1-26-34

**Розробка електронної частини комплексу для визначення технічного стану циліндропоршневої групи дизеля / Капіца М.І., Бобирь Д.В., Кислий Д.М., Богомолов А.Р. // Залізничний транспорт України. – 2022. – № 1. – С. 26-34.**

Метою та завданням наведених у статті досліджень є розробка апаратно-програмного комплексу для визначення технічного стану циліндропоршневої групи, що забезпечить зменшення витрат матеріальних ресурсів та часу на виконання операцій з її технічного діагностування, зменшення часу простою на всіх видах ремонтів, в тому числі позапланових, та забезпечення відповідного рівня безпеки руху рухомого складу. Розроблено методику визначення технічного стану циліндропоршневої групи, яка базується на застосуванні математичних методів інтерполяції, системного аналізу, теорії двигунів внутрішнього згоряння та засобів програмування електронних контролерів.

В ході виконання даного дослідження виконано огляд та аналіз характеристик різних типів датчиків масової витрати повітря. На підставі характеристик датчиків масової витрати повітря та з урахуванням їх недоліків розроблено комплекс, призначений для визначення масової витрати повітря, який буде забезпечувати реалізацію поставлених задач з нерозбірного технічного діагностування циліндропоршневої групи та написано програму керування контролером, який забезпечує опитування датчиків масової витрати повітря та визначення значення параметрів технічного діагностування циліндропоршневої групи. Розроблено метод нерозбірного діагностування силової енергетичної установки за втратами свіжого заряду в циліндрах дизеля. На відміну від існуючих методів нерозбірного технічного діагностування застосування даного апаратного комплексу при технічному діагностуванні циліндропоршневої групи потребує значно менше машинного часу при високій точності розрахунків, що дає можливість значно скоротити витрати часу на виконання технологічних операцій з технічного діагностування та підвищити економію матеріальних, людських та енергоресурсів.

**Ключові слова:** дизель, циліндропоршнева група, витрата повітря, датчик витрати повітря, термоанемометр, нерозбірне діагностування, тяговий рухомий склад, силова енергетична установка, технічне обслуговування.

УДК 621.43.038.2:621.425

DOI: 10.34029/2311-4061-2022-142-1-35-44

**Дослідження коливань в електронній системі регулювання дизеля тепловоза на режимах, що встановилися і перехідних / Зонов В.Д., Матяш В.О., Білоус Ю.А., Польників Ю.В., Левцов В.Б. // Залізничний транспорт України. – 2022. – № 1. – С. 35-44.**

У статті приведені результати моделювання та досліджень перехідних процесів дизеля тепловоза К6S310DR, обладнаного електронною системою автоматичного регулювання СУДМ-01 і форсунками спеціальної конструкції із стійким способом (законом) паливоподачі на усіх частотах обертання колінчастого валу і потужностях двигуна, включаючи перехідні режими. Застосування форсунок спеціальної конструкції забезпечує на перехідних режимах показник нерівномірності робочого процесу дизеля 0,7 %, при середньому максимальному тиску згоряння  $P_z$  по циклах на режимі холостого ходу 4,39 МПа.

При обладнанні дизеля К6S310DR штатним регулятором частоти обертання і потужності та штатними форсунками показник нерівномірності робочого процесу складає 9,2 %, при середньому максимальному тиску згоряння  $P_z$  по циклах на режимі холостого ходу 3,83 МПа.

Розроблена математична модель розрахунку коефіцієнта впливу перехідних процесів на витрати палива дизеля К6S310DR на перехідних режимах. Досліджений вплив кількості перехідних процесів на витрату палива дизеля К6S310DR на перехідних режимах.

**Ключові слова:** математична модель, перехідний процес, дизель, тепловоз, система автоматичного регулювання СУДМ-01, витрати палива, коефіцієнт впливу перехідного процесу.

УДК 004.94

DOI: 10.34029/2311-4061-2022-142-1-45-50

**Дослідження ефективності архітектур штучних нейронних мереж для прогнозу електроспоживання залізниць / Гайденок О.С., Голуб Г.М., Кульбовський І.І., Штомпель Ю.М. // Залізничний транспорт України. – 2022. – № 1. – С. 45-50.**

У статті розглянуто зміну архітектури штучної нейронної мережі як потенційний шлях підвищення її ефективності при управлінні електропостачанням залізниць. Проведено експериментальне дослідження впливу архітектур та конфігурації штучної нейронної мережі на якість її навчання. Для оцінки точності прогнозування використано критерій Mean Squared Error (середньоквадратичну помилку). Для регуляризації використано алгоритм Байєсівської регуляризації навчання. Отримано менше значення середньоквадратичної помилки за рахунок маніпуляцій з архітектурою та конфігурацією штучної нейронної мережі. Проведено порівняння архітектур Feed-forward та NARX для прогнозу



електроспоживання на електрифікованій ділянці залізниці, які показали схожі результати. Архітектура NARX у завданні прогнозу споживання електричної енергії залізничним транспортом виявилася перспективнішою для практичного застосування. У результаті експериментального дослідження конфігурації NARX встановлено суттєву залежність поведінки моделі від кількості нейронів у вхідному шарі.

**Ключові слова:** прогнозування, нейронна мережа, Matlab, Neural Network Toolbox, залізниці, електроспоживання, NARX, Feed-forward.

УДК 625.09

DOI: 10/34029/2311-4061-2022-142-1-51-54

**Іштван Зоборі – вчений та організатор науки / Мямлін С. В. // Залізничний транспорт України. – 2022. – № 1. – С. 51-54.**

На початку 2022 року пішов із життя видатний вчений-механік та організатор міжнародних наукових конференцій у галузі залізничного транспорту, почесний професор Будапештського університету технологій та економіки, член міжнародної редакційної колегії науково-практичного журналу «Залізничний транспорт України», доктор технічних наук,

професор Іштван Зоборі. Почавши свою трудову діяльність у Будапештському університеті технологій та економіки у 1976 році, Іштван Зоборі до кінця життя зберігав вірність традиціям університетської науки. В 1981 захистив дисертацію кандидата технічних наук, а в 1993 захистив дисертацію доктора технічних наук. За час роботи в університеті пройшов шлях від викладача кафедри до завідувача кафедри та декана факультету. За свою історію кафедра та факультет змінювали назву, але завжди були пов'язані із залізничним транспортом та інженерією. Професора Іштвана Зоборі завжди відрізняли високий професіоналізм, порядність, інтелігентність та людяність у стосунках зі студентами, викладачами та колегами.

**Ключові слова:** доктор технічних наук Зоборі Іштван, вчений-механік, залізниці, подовження динаміка поїзда, динаміка рухомого складу, взаємодія рухомого складу та колії.

## РЕФЕРАТЫ

УДК 629.4.027.5

DOI: 10.34029/2311-4061-2022-142-1-04-13

**Оценка ресурса несущих конструкций вагонов метрополитена моделей 81-717 и 81-714 после длительной эксплуатации / Путятю А.В. // Железнодорожный транспорт Украины. – 2022. – № 1. – С. 4-13.**

Приведены результаты обследования технического состояния головного и промежуточного вагонов метрополитена после длительной эксплуатации. Выполнена серия расчетов на прочность методом конечных элементов их металлоконструкций с учетом фактического и прогнозного технического состояния основных несущих элементов. Приведены результаты экспериментальных исследований напряженного состояния напряженного состояния кузовов вагонов метрополитена. Получены массивы динамических напряжений в конструктивных элементах кузовов вагонов при различных режимах эксплуатации.

Полученный массив экспериментальных данных использован для оценки остаточного ресурса несущих конструкций вагонов метрополитена после длительной эксплуатации.

**Ключевые слова:** вагоны метрополитена, несущая конструкция, длительная эксплуатация, прочность, метод конечных элементов, испытания, тензометрирование, напряжения, остаточный ресурс.

УДК 625.143.5

DOI: 10/34029/2311-4061-2022-142-1-14-19

**Внедрение новых конструкций упругих рельсовых креплений на железных дорогах Украины / Демченко С.М., Татуревич А.А., Макаров Ю.О. // Железнодорожный транспорт Украины. – 2022. – № 1. – С. 14-19.**

В статье приведена информация о результатах эксплуатационных испытаний рельсовых упругих креплений типа VosslohSystem W-30 компании «Фосло Фастейнинг Системс ГмбХ» и SBS W SL-1-900-R65 компании «SCHWING AG», которые хорошо зарекомендовали себя на железных дорогах многих стран мира. Крепления Vossloh и SBS надежны и легки в обслуживании, что обеспечивает постоянную поддержку заданных параметров пути. Для определения технических характеристик креплений в условиях эксплуатации на железных дорогах Украины были уложены участки пути с опытными креплениями в региональном филиале «Одесская железная дорога». Эксплуатационные испытания обоих типов креплений выполнялись с целью определения соответствия параметров креплений реальным условиям эксплуатации на главных путях АО «Укрзализныця», а также принятия решения о внедрении креплений в постоянную эксплуатацию.

**Ключевые слова:** железная дорога, путь, крепление, клемма упругая, прокладка

*подрельсовая, углонаправляющая плита, боковой упор, шуруп путевого, дюбель пластмассовый.*

УДК 621.436:629.128.6

DOI: 10.34029/2311-4061-2022-142-1-20-25

**Диагностика рабочего процесса двухтактных двигателей MAN B&W / Варбанец Р.А., Мальчевский В.П., Кучеренко Ю.Н., Минчев Д.С., Кириак В.І., Бондаренко В.В. // Железнодорожный транспорт Украины. – 2022. – № 1. – С. 20-25.**

Использование двигателей с двухтактным принципом действия на тепловозах в АО «Укрзалізниця» стимулирует развитие современных методов контроля их рабочего процесса. В первую очередь речь идет о неразрушающих методах контроля в условиях сокращенного времени во время реостатных испытаний.

Опыт использования диагностики рабочего процесса морских и стационарных двухтактных двигателей, широко распространенных на морском флоте, несомненно, будет полезен и может быть с успехом применен на тепловозных двигателях, поскольку многие задачи и проблемы эксплуатации двигателей на транспортных средствах являются общими для морских и тепловозных двигателей. Прежде всего, это работа на нестационарных режимах, для которых актуально применение аналитических методов синхронизации данных в альтернативу аппаратным методам, а также методов вибродиагностики.

Изменение температуры топлива также оказывает влияние на рабочий процесс. Ряд параметров рабочего процесса таких, как задержка самовоспламенения, а также характеристики сгорания в цилиндрах, зависят от стабильной работы системы топливоподготовки и прежде всего от работы системы стабилизации температуры топлива на входе в топливные насосы высокого давления.

Использование современных методов синхронизации данных и вибродиагностики расширяет возможности контроля рабочего процесса двигателей. Используя существующие методы, невозможно производить при эксплуатации прямые измерения давления впрыска топлива, фаз подачи и газораспределения двигателей с помощью переносных диагностических систем. Альтернативой прямым измерениям является анализ вибродиаграмм, с помощью которого можно определить фазы подъема и посадки иглы форсунки, начала подачи и отсечки топлива насосом высокого давления, начало и конец циркуляции подогретого тяжелого топлива в топливной системе, а также фазы закрытия и, в некоторых случаях, открытия клапанов газораспределения и контроль температуры топлива.

В статье приведены результаты диагностики двухтактных дизелей электростанции Mahon, находящейся на острове Менорка (Испания). Для моделирования рабочего процесса с учетом эксплуатационных факторов использован ресурс Blitz-PRO.

**Ключевые слова:** дизели, рабочий процесс, моделирование, диагностика, топливная аппаратура, клапаны газораспределения.

УДК 629.424.3:[621.434:004.416.6]

DOI: 10.34029/2311-4061-2022-142-1-26-34

**Разработка электронной части комплекса для определения технического состояния цилиндропоршневой группы дизеля / Капица М.И., Бобырь Д.В., Кислый Д.Н., Богомолов А.Р. // Железнодорожный транспорт Украины. – 2022. – № 1. – С. 26-34.**

Целью и задачей изложенного в статье исследования является разработка аппаратно-программного комплекса для определения технического состояния цилиндропоршневой группы, что обеспечит уменьшение затрат материальных ресурсов и времени на выполнение операций по ее техническому диагностированию, уменьшение времени простоя на внеплановых видах ремонтов и соответствующего уровня безопасности движения подвижного состава. Представленная методика определения технического состояния цилиндропоршневой группы основана на применении математических методов интерполяции, системного анализа, теории двигателей внутреннего сгорания и средств программирования электронных контроллеров.

В ходе выполнения данного исследования выполнено обзор и анализ характеристик различных типов датчиков массового расхода воздуха. На основании характеристик датчиков массового расхода воздуха и с учетом их недостатков разработан комплекс, предназначенный для определения массового расхода воздуха, который будет обеспечивать реализацию поставленных задач по неразборному диагностированию цилиндропоршневой группы и написана программа управления контроллером, обеспечивающим опрос датчиков массового расхода воздуха и определение значения параметров технического диагностирования цилиндропоршневой группы. Разработан метод неразборной диагностики силовой энергетической установки по потерям свежего заряда в цилиндрах дизеля. В отличие от существующих методов неразборного технического диагностирования применение данного аппаратного комплекса при техническом диагностировании цилиндропоршневой группы требует значительно меньше машинного времени при высокой точности расчетов, что позволяет значительно сократить затраты времени на выполнение технологических операций по техническому диагностированию и

повысить экономию материальных, человеческих и энергоресурсов.

**Ключевые слова:** *дизель, цилиндропоршневая группа, расход воздуха, датчик расхода воздуха, термоанемометр, неразборное диагностирование, подвижной состав, силовая энергетическая установка, техническое обслуживание.*

УДК 621.43.038.2:621.425

DOI: 10.34029/2311-4061-2022-142-1-35-44

**Исследование колебаний в электронном системе регулирования тепловозного дизеля на установившихся и переходных режимах / Зонов В.Д., Матяш В.О., Белоус Ю.А., Польшников Ю.В., Левцов В.Б. // Железнодорожный транспорт Украины. – 2022. – № 1. – С. 35-44.**

В статье приведены результаты моделирования и исследований переходных процессов тепловозного дизеля K6S310DR, оборудованного электронной системой автоматического регулирования СУДМ-01 и форсунками специальной конструкции с устойчивым способом (законом) топливоподачи на всех частотах вращения коленчатого вала и мощностях двигателя, включая переходные режимы. Применение форсунок специальной конструкции обеспечивает на переходных режимах степень неравномерности рабочего процесса дизеля 0,7 %, при среднем максимальном давлении сгорания  $P_z$  по циклам на режиме холостого хода 4,39 МПа.

При оборудовании дизеля K6S310DR штатным регулятором частоты вращения и мощности, штатными форсунками степень неравномерности рабочего процесса составляет 9,2 %, при среднем максимальном давлении сгорания  $P_z$  по циклам на режиме холостого хода 3,83 МПа.

Разработанная математическая модель расчета коэффициента влияния переходных процессов на расход топлива дизелем K6S310DR на переходных режимах его работы. Исследовано влияние количества переходных процессов на расход топлива дизелем K6S310DR при работе на переходных режимах.

**Ключевые слова:** *математическая модель, переходной процесс, дизель, тепловоз, система автоматического регулирования СУДМ-01, расход топлива, коэффициент влияния переходного процесса.*

УДК 004.94

DOI: 10.34029/2311-4061-2022-142-1-45-50

**Исследование эффективности архитектур искусственных нейронных сетей для прогноза электропотребления железных дорог / Гайденко О.С., Голуб Г.М., Кульбовський И.И., Штомпель Ю.Н. // Железнодорожный транспорт Украины. – 2022. – № 1. – С. 45-50.**

В статье рассмотрены изменения архитектуры искусственной нейронной сети как потенциальный

путь повышения ее эффективности при управлении электроснабжением железных дорог. Проведено экспериментальное исследование влияния архитектур и конфигурации искусственной нейронной сети на качество ее обучения. Для оценки точности прогнозирования использовано критерий Mean Squared Error (среднеквадратичную ошибку). Для регуляризации использован алгоритм Байесовский регуляризации обучения. Получено меньшее значение среднеквадратичной ошибки за счет манипуляций с архитектурой и конфигурацией искусственной нейронной сети. Проведено сравнение архитектур Feed-forward и NARX для прогноза электропотребления на электрифицированном участке железной дороги, которые показали похожие результаты. Архитектура NARX в задании прогноза потребления электрической энергии железнодорожным транспортом оказалась более перспективной для практического применения. В результате экспериментального исследования конфигурации NARX установлено существенную зависимость поведения модели от количества нейронов во входном слое.

**Ключевые слова:** *прогнозирование, нейронная сеть, Matlab, Neural Network Toolbox, железные дороги, электропотребление, NARX, Feed-forward.*

УДК 625.09

DOI: 10.34029/2311-4061-2022-142-1-51-54

**Иштв́ан Зобори – ученый и организатор науки / Мямлин С. В. // Железнодорожный транспорт Украины. – 2022. - № 1. – С. 51-54.**

В начале 2022 года ушел из жизни выдающийся ученый-механик и организатор международных научных конференций в области железнодорожного транспорта, почетный профессор Будапештского университета технологий и экономики, член международной редакционной коллегии научно-практического журнала «Железнодорожный транспорт Украины», доктор технических наук, профессор Иштван Зобори. Начав свою трудовую деятельность в Будапештском университете технологий и экономики в 1976 году, Иштван Зобори до конца жизни сохранял верность традициям университетской науки. В 1981 году защитил диссертацию кандидата технических наук, а в 1993 году защитил диссертацию доктора технических наук. За время работы в университете прошел путь от преподавателя кафедры до заведующего кафедрой и декана факультета. За свою историю кафедра и факультет меняли название, но всегда были связаны с железнодорожным транспортом и инженерией. Профессора Иштвана Зобори всегда отличали высокий профессионализм, порядочность, интеллигентность и человечность в отношениях со студентами, преподавателями и коллегами.

**Ключевые слова:** *доктор технических наук Зобори Иштв́ан, ученый-механик, железные дороги,*

## ABSTRACTS

UDC 629.4.027.5

DOI: 10.34029/2311-4061-2021-138-1-04-13

**Estimate the resource of constructions subway cars models 81-717 и 81-714 after long-term operation / A. Putsiata // Railway transport of Ukraine. – 2022. – № 1. – pp. 4-13.**

Results of a technical condition of head and intermediate cars of the subway after long operation are presented. Calculations on durability metalworks taking into account actual and prospective a technical condition of the bearing elements are executed by a method of finite elements. The results of experimental determination of the stresses in the bodies of the head and intermediate cars of the subway after long-term operation. The arrays of dynamic stresses in the structural elements of cars for different operating conditions are obtained. The values of stresses are no more of level established by normative documentation. Experimental data used to estimate the residual resource of constructions subway cars after long-term operation.

**Keywords:** cars of the subway, structural elements, long operation, finite element modeling, stresses, experimental determination, residual resource.

### References

1. Antipin D. YA., Vysockij A. M., Kolchina E. V. (2018) Prognozirovanie resursa ramy universal'nogo vagona-platformy s ispol'zovaniem sovremennykh elementov SAPR [Prediction of resource of frame of a universal platform car use of modern CAD tools]. *In II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "SAPR i modelirovanie v sovremennoj elektronike" : sbornik trudov*, 3–6 [in Russian].
2. Borisov S.V. (2006). Prognozirovanie ostatochnogo resursa i prodlenie sroka sluzhby vagonov metropolitena: dis. na soisk. uch. step. kand. tekhn. nauk [Predicting the residual life and extending the service life of subway cars]. SPb.: PGUPS. 168 s. [in Russian].
3. Grigor'ev P.S. (2016). Prognozirovanie ostatochnogo resursa ram promyshlennykh teplovozov: dis. na soisk. uch. step. kand. tekhn. nauk [Predicting the residual life of industrial diesel locomotive frames]. MGUPS. M., 2016. 150 s [in Russian].
4. Zimakova M.V. (2012). Prodlenie sroka sluzhby vagonov-cistern s uchetom izmeneniya fiziko-mekhanicheskikh svoystv metallokonstrukcij bazovykh uzlov: dis. na soisk. uch. step. kand. tekhn. Nauk [Extension of the service life of tank cars, taking into account changes in the physical and mechanical properties of the metal structures of the base units].. – SPb.: PGUPS. [in Russian].
5. Demberelsuren O. (2014). Ocenka ostatochnogo resursa i prodlenie srokov sluzhby passa-zhirskih vagonov UBZHD [Residual resource assessment and service life extension of UBZHD passenger cars]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie*. 3(43). 97–103 [in Russian].
6. Kel'rih M. B., Brajkovskaya N. S., Prokopenko P. N. (2019). Osobennosti provedeniya issledovaniy po prodleniyu naznachennogo sroka sluzhby vagonov-cistern dlya perevozki legkikh poroshkoobraznykh gruzov [Features of research to extend the assigned service life of tank cars for the transportation of light powdery cargo] // *In IX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Problemy bezopasnosti na transporte" : materialy*, 158–160 [in Russian].
7. Kobishchanov V. V., Antipin D. YA. (2006). Ocenka ustalostnoj dolgovechnosti svarnykh nesushchikh konstrukcij vagonov s uchetom zhivuchesti [Evaluation of fatigue life of welded load-bearing structures of cars, taking into account survivability]. *Tyazheloe mashinostroenie*. 11. 14–17 160 [in Russian].
8. Korshunov S. D. (2014). Sovershenstvovanie metodov ocenki nesushchej sposobnosti i ostatochnogo resursa kuzovov passazhirskih vagonov posle remonta : dis. kand. tekhn. nauk [Improvement of methods for assessing the bearing capacity and residual life of passenger car bodies after repair]. Bryansk. [in Russian].
9. Volohov G. M. (2019) Modernizatsiya manevrovyykh teplovozov s prodleniem sroka sluzhby [Modernization of shunting locomotives with extension of service life]. *Lokomotiv*. 4(748), 32–34 [in Russian].
10. Ob"edinenie proizvoditelej zheleznodorozhnoj tekhniki (2010). *Normy dlya proektirovaniya, rascheta i ocenki prochnosti i dinamiki mekhanicheskoy chasti vagonov metropolitena kolei 1520 mm*. [Standards for the design, calculation and assessment of the strength and dynamics of the mechanical part of 1520 mm subway cars]. [in Russian].
11. Boronenko YU. P., Tret'yakov A. V., ZHarova E. A., Semiglazov O. A. (2012). O korrektyrovke «Polozheniya o prodlenii sroka sluzhby gruzovykh vagonov, kursiruyushchikh v mezhdunarodnom soobshchenii» [On the adjustment of the "Regulation on the extension of the service life of freight cars plying in international traffic". *Evrasiya Vesti*. X. 13–14 [in Russian].

12. Ogan'yan E. S., Volohov G. M., Gadzhimetov G. I. (2018) O poryadke obnovleniya parka i prodleniya srokov sluzhby lokomotivov i ih osnovnogo oborudovaniya [On the procedure for updating the fleet and extending the service life of locomotives and their main equipment]. *ZHeleznodorozhnyy transport*. 3. 69–71 [in Russian].

13. Myamlin S. V., Rejdmeyster O. G., Pulariya A. L., Kalashnik V. O. (2015). Razrabotka rekomendacij po prodleniyu sroka poleznoj ekspluatatsii passazhirskih vagonov [Development of Recommendations for Extending the Useful life of Passenger Cars]. *Nauka ta progres transport*, 6 (60), 118–126 [in Russian].

14. Sen'ko V. I., Pigunov A. V. (2004). Kompleksnaya ocenka ostatochnoy nesushchej sposobnosti kuzovov passazhirskih vagonov [Comprehensive assessment of the residual bearing capacity of passenger car bodies]. BelGUT. [in Russian].

15. Tret'yakov A. V. (2004). Upravlenie individual'nym resursom vagonov v ekspluatatsii [Management of the individual resource of wagons in operation]. Izdatel'stvo OM-Press. 348 s [in Russian].

16. Boiko A. (2013) Assessment of remaining resource of tank wagons with expired life time: *Summary of Doctoral Dissertation: Engineering sciences*. Riga. [in English].

17. Gorobets V. L., Bondarev O. M., Skoblenko V. M. (2014). Operation characteristics of electric trains ER1, ER2 be-yond designed service life. *Nauka ta progres transport*, 6(54). 119–127 [in English].

UDC 625.143.5

DOI: 10/34029/2311-4061-2022-142-1-14-19

**Introduction of new designs of elastic rail fastenings on the railways of Ukraine / S. Demchenko, A. Taturevich, Yu. Makarov // Railway transport of Ukraine. – 2022. – No. 1. – pp. 14-19.**

The article contains information about the results of operational tests of elastic rail fasteners of the Vossloh System W-30 type from Foslo Fastening Systems GmbH and SBS W SL-1-900-R65 from SCHWIBAG AG, which have proven themselves well on the railways of many countries around the world. The fasteners Vossloh and SBS are reliable and easy to maintain, ensuring that the specified track parameters are always maintained. To determine the technical characteristics of fasteners under operating conditions on the railways of Ukraine, track sections with experimental fastenings were laid at the regional branch of the Odessa Railway. Operational tests of both types of fasteners were carried out in order to determine the compliance of the fastening parameters with real operating conditions on the main tracks of JSC Ukrzaliznytsia, as well as to make a decision on the introduction of fasteners into permanent operation.

**Keywords:** railway, track, fastening, elastic clamp, rail pad, angle guide plate, side stop, track screw, plastic dowel.

#### References

1. Lysiuk V.S., Kamenskii V.B., Bashkatova L.V. (2001). Nadezhnost zheleznodorozhnogo puti [Railway reliability]. Moscow: Transport [in Russian].

2. OSJD Committee (2009). Technical Requirements for Rail Fasteners for High Speed Traffic (UIC Code No. P-749) [in Russian].

3. Danilenko E.I., Kostyuk M.D. (2002). Obespechenie nadezhnosti i prochnosti uprugikh skreplenii dlia povysheniia bezopasnosti dvizheniia poezdov [Ensuring the reliability and strength of elastic fasteners to improve the safety of train traffic]. *Bulletin of BSUT*, 2(5), 21-25 [in Russian].

4. Albrekht V.G., Zolotarskii A.F. (1975). Sovremennye konstruktii verkhnego stroeniia zheleznodorozhnogo puti [Modern structures of the railroad track superstructure]. Moscow: Transport [in Russian].

5. Shekerbekov U.T., Osmonkanov N.A. (2013). Opyt primeneniia relsovogo skreplenii Vossloh (Germaniia) [Experience of using rail fastening Vossloh (Germany)]. *The Herald of KSUCTA*, 4, 196-201 [in Russian].

6. Kuznetsova N. V., Sidorova E. A. (2021). Osobennosti vliyaniya promezhutochnykh relsovykh skrepleniy na ekspluatatsionnyy stoykost relsov [Features of the influence of intermediate rail fastenings on the operational durability of rails]. *VNIIZHT Scientific Journal*, 80 (4), 201-208 [in Russian].

7. Skriplennja promizhne pruzhne rejkove Vossloh System W-30. Prohrama ta metodyka ekspluatatsijnykh vyprobuvanj doslidnoji partiji [Intermediate rail fastening of railway track Vossloh System W-30. Program and methodology of operational tests of an experimental batch]. (2019). Vossloh System W-30 PM1, 19 p. [in Ukrainian].

UDC 621.436:629.128.6

DOI: 10.34029/2311-4061-2022-142-1-20-25

**MAN B&W 2-stroke marine engines performance analysis / R. Varbanets, V. Malchevsky, Yu. Kucherenko, D. Minchev, V. Kirnats, V. Bondarenko // Railway Transport of Ukraine. – 2022. – № 1. – pp. 20-25.**

Application of the engines with a two-stroke principle of operation on diesel locomotives in Ukrzaliznytsia stimulates the development of modern methods for working process monitoring. The non-destructive methods of control under time-limited during rheostatic tests conditions are considered as the priority.

The experience of diagnosing the working process of marine and stationary two-stroke engines, could be successfully applied to the locomotive diesel engines, since many tasks and problems of operating engines on vehicles are similar to marine

engines. The operation in non-stationary modes is the first to be mentioned, which require the use of the analytical methods of data synchronization as an alternative to hardware methods, as well as vibration diagnostic methods.

Changes in fuel temperature affect the working process. A number of parameters of the working process and fuel supply, such as the quality of mixture formation, self-ignition delay and combustion characteristics in the cylinders, depend on the operation of the fuel preparation system and, primarily, on the operation of the temperature stabilization system at the inlet to high-pressure fuel pumps.

The implementation of advanced data synchronization methods and vibration diagnostics expands the possibilities of engines diagnosing. Existing methods don't allow carrying out direct measurements of fuel injection pressure, fuel supply phases and gas distribution of engines during operation using portable diagnostic systems. An alternative to direct measurements is the analysis of vibration diagrams, which can be used to determine the phases of the rise and landing of the nozzle needle, the start of fuel feed and cut-off of fuel by the high-pressure fuel pump, the beginning and end of the circulation of heated heavy fuel in the fuel system, as well as the phases of closing and, in some cases, opening gas distribution valves.

The paper presents the results of two-stroke diesel engines diagnostic at the Mahon power station, located on the island of Menorca (Spain). Various malfunctions of the injector and exhaust valve were identified during the diagnostic. To simulate the working process taking into account operational factors, the Blitz-Pro resource was used.

**Keywords:** diesel engines, working process, modeling, diagnostics, fuel equipment, gas distribution valves.

## References

1. Mahon central power station and health. – Available from: <https://english.gobmenorca.com/mahon-central-power-station-and-health/> [in English].
2. Heywood J. (1988). *Internal combustion engine fundamentals*. New York: McGraw-Hill, 1988 [in English].
3. Neumann S. (2001). High temperature pressure sensor based on thin film strain gauges on stainless steel for continuous cylinder pressure control. Hamburg: CIMAC Congress. Digest. [in English].
4. Neumann S., Varbanets R., Kyrilash O., Yeryanov O., Maulevych V. (2019). Marine diesels working cycle monitoring on the base of IMES GmbH pressure sensors data. *Diagnostyka*, 20 (2), 19–26. <https://doi.org/10.29354/diag/104516> [in English].
5. Varbanets R. (2010). Diagnostic control of the working process of marine diesel engines in operation: dissertation of the Doctor of Technical Sciences. Odessa, 2010. [in English].

6. Varbanets R., Fomin O., Pištěk V., Klymenko V., Minchev D., Khrulev A., Zalozh V.; Kučera P. (2021). Acoustic Method for Estimation of Marine Low-Speed Engine Turbocharger Parameters. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9 (3), 321, 1–12. <http://dx.doi.org/10.3390/jmse9030321> [in English].

7. Varbanets R., Karianskiy A. (2012). Analyze of marine diesel engine performance. *Journal of Polish CIMAC. Energetic Aspects, Gdansk, Faculty of Ocean Engineering and Ship Technology Gdansk University of Technology*, 7 (1), 269–275. [in English].

8. Varbanets R., Karianskyi S., Rudenko S. (2017). *Improvement of diagnosing methods of the diesel engine functioning under operating conditions*. SAE Technical Paper 2017-01-2218. [in English].

9. IMO (2020). International Convention for the Safety of Life At Sea, part B. Prevention of fire and explosion, paragraph 2.2.5.2. SOLAS Consolidated Edition 2020. London: International Maritime Organization [in English].

10. Minchev D., Varbanets R., Aleksandrovska N., Pisintsaly L. (2021). Marine Diesel Engines Operating Cycle Simulation for Diagnostics Issues. *Acta Polytechnica*, 3 (61), 428–440. Available from: <http://dx.doi.org/10.14311/AP.2021.61.0435> [in English].

11. Blitz-PRO by D.S. Minchev. User's manual. Available from: <http://blitzpro.zeddmalam.com/extra/Tutorial/Help.pdf> [in English].

12. Minchev D., Minchev D., Varbanets R. (2021). Centrifugal compressor performance maps treatment for internal combustion engines operating cycle simulation. *Internal combustion engines*, 1, 9–15. Doi: 10.20998/0419-8719.2021.1.02 [in English].

13. Varbanets R., Zalozh V., Shakhov A., Savelieva I., Pitera V. (2020). Determination of top dead centre location based on the marine diesel engine indicator diagram analysis. *Diagnostyka*, 21 (1), 51–60. <https://doi.org/10.29354/diag/116585> [in English].

UDC 629.424.3:[621.434:004.416.6]

DOI:10.34029/2311-4061-2022-142-1-26-34

**Development of the electronic part of the complex for determining the technical condition of the cylinder-piston group of the diesel engine / M. Kapitsa, D. Bobyr, D. Kyslyi, A. Bohomolov // Railway Transport of Ukraine. – 2022. – № 1. – pp. 26–34.**

Diesel locomotive power plant is a complex system, its technical condition directly affects the implementation of the plan of passenger and freight traffic and traffic safety. Therefore, diagnosing a diesel power unit is one of the most important tasks in determining the technical condition of traction rolling stock.

The purpose and task of the study is to develop a hardware and software complex to determine the technical condition of the cylinder-piston group,



which will reduce the cost of material resources and time to perform operations for its technical diagnosis, reduce downtime for unscheduled repairs and ensure the appropriate level of traffic safety.

The method of determining the technical condition of the cylinder-piston group is based on the application of mathematical methods of interpolation, systems analysis, the theory of internal combustion engines and programming tools for electronic controllers.

In the course of this study, a review and analysis of the characteristics of different types of mass air flow sensors. Based on the characteristics of mass air flow sensors and taking into account their shortcomings, a complex designed to determine the mass air flow, which will ensure the implementation of tasks for non-demountable technical diagnostics of the cylinder-piston group, and a control program was written. parameters of technical diagnostics of the cylinder-piston group.

A method of non-detachable diagnostics of a power plant based on fresh charge losses in diesel cylinders has been developed. Unlike existing methods of non-detachable technical diagnostics, the use of this hardware in the technical diagnosis of the cylinder-piston group requires much less machine time with high accuracy of calculations, which significantly reduces the time spent on technological operations for technical diagnostics and increase material, human and energy savings.

**Keywords:** diesel, cylinder-piston group, air flow, air flow sensor, non-detachable diagnostics, traction rolling stock, power plant, maintenance.

#### References

1. Bosov A.A. Bodnar E.B. Mosendz A.I. (2001). Osnovnaya zadacha sovershenstvovaniya sistemy planovo-predupreditelnykh remontov lokomotivov [The main task of improving the system of preventive maintenance of locomotives]. *Visnik Shkhidnoukr. nats. un-tu* [Bulletin of the Eastern Ukrainian National University], 7 (41), 93–97. [in Russian].
2. Bodnar B.Ye. Ochkasov O.B., Cherniaiev D.V., Detsiura O.Ya. (2012). Metody nerozbiroho diahnostuvannia dyzeliv pry ekspluatatsii rukhomoho skladu [Methods of nonseparable diagnostics of diesel engines in operation of rolling stock]. *Visnyk Dnipropetr. nats. un-tu zalizn. transp. im. akad. V. Lazariana* [Bulletin of the Dnipro National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan], 41, 63–67. [in Ukrainian].
3. Skalozub V.V. Ochkasov O.B., Kibets D.V. (2020). Avtomatyzovanyj ekspertnyj kompleks iz doslidzhennia ta prohnozuvannia parametriv sylovykh enerhetychnykh ustanovok lokomotyviv [Automated expert system for research and forecasting of the locomotive power facilities parameters]. *Inform.-keruiuchi systemy na zalizn. transp* [Bulletin of the Ukrainian State University of Railway Transport], 2, 8–18 [in Ukrainian].

4. Kukov S.S., Plaksyn A.M., Hrytsenko A.V., Hlemba K.V., Karpenko A.H., Rudnev V.V. (2016). Dyahnostyrovanye tsylindroporshnevoj hruppy po rezul'tatam otsenky dynamycheskoj kompressyy [Diagnostics of the cylinder-piston group based on the results of dynamic compression assessment]. *Fundamental'nye yssledovaniya*, 11-2, 300-305 [in Russian].

5. Konchakov E.I. (2007). *Tekhnicheskaya diagnostika sudovykh energeticheskikh ustanovok: ucheb. Posobiye* [Technical diagnostics of ship power plants]. Vladivostok: DVG TU. [in Russian].

6. Kapitsa M.I., Laguta V.V. (2013). Modeli rezhimov diagnostirovaniya tyagovogo podvizhnogo sostava s zamenoy komplektuyushchikh izdeliy [Model of diagnostics modes of traction rolling stock with replacement components]. *Elektromagnitna sumisnist ta bezpeka na zaliznichnomu transport* [Scientific and practical journal of the Dnipro National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan], 5, 56-62. [in Russian].

7. Bodnar B.Ye., Ochkasov O.B., Cherniaiev D.V. (2013). Vyznachennia metodu filtratsii syhnalu nerivnomirnosti chastoty obertannia kolinchastoho vala dyzelia [Definition of method signal filtering irregularity crankshaft speed of diesel]. *Nauka ta prohres transportu* [Bulletin of the Dnipro National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan], 1, 113-118 [in Ukrainian].

8. Nikitin E.A., Stanislavskiy L. V., Ulanovskiy E. A. (1987). *Diagnostirovaniye dizeley* [Diesel diagnostics]. Moscow : Mashinostroyeniye, 224 p. [in Russian].

9. Palaguta K. A. (2007). *Mikrokontrollery v sistemakh upravleniya sovremennykh avtomobiley* [Microcontrollers in control systems of modern cars]. Moscow : MGIU, 217 p. [in Russian].

10. Makarichev Yu.A. Ivannikov Yu.N. (2016). *Metody planirovaniye eksperimenta i obrabotki dannykh: ucheb. Posobiye* [Methods experiment planning and data processing], Samara : Samar. gos. tekhn. un-t. [in Russian].

11. Bodnar B., Ochkasov O., Chernyaev D., Skvireckas R. (2018). Use of the Wavelet Transform for the Analysis of Irregularity of Crankshaft Angular Velocity. *Transport Means 2018: Proc. of the 22nd Intern. Sci. Conf.* (Oct. 03–05, 2018, Trakai, Lithuania). Kaunas: Kaunas Univ. of Technology, Klaipeda Univ., JSC Lithuanian Railways, pp. 962–967. [in English].

UDC 621.43.038.2:621.425

DOI: 10.34029/2311-4061-2022-142-1-35-44

**Research of vibrations in the electronic system of adjusting of diesel of diesel engine on the modes that was set and transitional / V. Zonov, V. Matyash, Yu. Belous, Yu. Polnikov, V. Levtsov // Railway transport of Ukraine. - 2022. - № 1. - pp. 35-44.**

To the article the results of design of transients of the diesel engine diesel of K6S310DR, equipped by the electronic system of automatic control of CYDM-01 and sprayers of the special construction with the steady method (by a law) of on all frequencies of rotation and power, are driven, including transient behaviors. Application of sprayers of the special construction is provided on transient behaviors by the degree of unevenness of working process of diesel 0,7 % at middle maximal pressure of combustion of Pz on cycles on the mode of idling 4,39 MPa.

At the equipment of diesel of K6S310DR a degree of unevenness of working process is 9,2 % the regular regulator of frequency of rotation and power and regular sprayers at middle maximal pressure of combustion on cycles Pz on the mode of idling 3,83 MPa.

The mathematical model of calculation of coefficient of influence of transients is worked out on the expense of fuel of diesel of K6S310DR on transient behaviors. Influence of amount of transients is investigational on the expense of fuel of diesel of K6S310DR on transient behaviors.

**Keywords:** *mathematical model, transitional process, diesel, locomotive, system of automatic control of CYDM-01, expense of fuel, coefficient of influence of transient.*

#### References

1. Ovcharenko S.M., Korneyev I.S., Chetvergova V. A. (2012). Vliyaniye perekhodnykh protsessov na raskhod topliva dizelem v ekspluatatsii [The influence of transient processes on diesel fuel consumption in operation]. *Izvestiya Transsiba*, 1 (9), 27-32. [in Russian].
2. Kossov Ye. Ye., Sukhoparov S. I. (1999). *Optimizatsiya rezhimov raboty teplovoznnykh dizel-generatorov*. [Optimization of operating modes of diesel locomotive generators] Moscow: Intekst, 184 [in Russian].
3. Kossov Ye.Ye., Furman V.V. (2012). Sovershenstvovaniye kachestva perekhodnogo protsessa pri smene rezhima raboty dizel-generatora teplovoza [Improving the quality of the transient process when changing the operating mode of the diesel generator of a locomotive]. *Vestnik VNIIZHT*, 2, 27-30. [in Russian].
4. Patent WO 2014/142775A1 Mezhdunarodny. F02M 45/08 (2006/01), F02M 45/08 (2006/01), F02M 53/04 (2006/01). Raspylitel' forsunki spetsial'noy konstruktzii dvigatelya vnutrennego sgoraniya [Patent WO 2014/142775A1 International. F02M 45/08 (2006/01) F02M 53/04 (2006/01). Spray nozzle of a special design of an internal combustion engine] \ V.D. Zonov; zayavitel' i patentoobladatel' V.D. Zonov; zayavl. 14.03.2013; opubl/18/09/2014 WIPO/PCT [in Ukraine].
5. Zonov V.D., Dan'ko M.Y., But'ko T.V., Topchyev M.P. (2004). Matematychnye modelyuvannya vytrat palyva manevrovymy lokomotyvamy [Mathematical modeling of fuel

consumption by shunting locomotives]. *Railway transport of Ukraine*, 3, 29-32. [in Ukraine].

6. Zonov V.D. (2005). Matematychnye modelyuvannya ta doslidzhennya enerhetychnykh kharakterystyk palyvopodachi u forsunkakh spetsial'noyi konstrukttsiyi [Mathematical modeling and research of energy characteristics of fuel supply in nozzles of special construction]. *Mizhvuzivska zbirka naukovykh prats Ukrayinskoyi Akademiyi zaliznychnoho transportu*, 70, 112-123 [in Ukraine].

7. Zonov V.D., Eroshchenkov S.A., Hryhor'ev O.L. (2001). Matematychnye modelyuvannya protsesu palyvopodachi u forsunkakh spetsial'noyi konstrukttsiyi [Mathematical modeling of the fuel supply process in nozzles of special design]. *Zbirnyk naukovykh prats*, 45, 82-88. Kharkiv [in Ukraine].

8. Yepishin A.Y. (2017). Staticheskiye kharakteristiki i perekhodnyye protsessy dizel'-generatornoy ustanovki teplovoza [Static characteristics and transient processes of a diesel generator set of a diesel locomotive]. *Dvigatelistroyeniye*, 3, 3-8. [in Russian].

9. Plakhov S.V. (2019). Modelirovaniye sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya chastoty vrashcheniya dizelnogo dvigatelya [Modeling of the system of automatic control of the speed of rotation of a diesel engine]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy: Mashinostroyeniye*, 7, 35-46. [in Russian].

10. Sobol V.N., Zaslavskiy E.G., Pogrebnyak V.V. (1970). Uluchsheniye perekhodnykh protsessov teplovoznnykh dizeley 10D100 i D70 [Improvement of transient processes of diesel locomotive diesels 10D100 and D70]. *Elektricheskaya i teplovoznaya tyaga*, 11, 44-45. [in Russian].

11. Kossov Ye.Ye., Povarkov I.L. (1977). Eksperimentalnoye issledovaniye perekhodnykh protsessov teplovoznnykh dizeley i sistem avtomaticheskogo regulirovaniya [Experimental study of transient processes of diesel locomotive diesel engines and automatic control systems]. *Trudy VNIIZHT*, 570, 71-93. [in Russian].

12. Kossov Ye.Ye. (2002). Mikroprotsessornaya sistema regulirovaniya dizel'-generatora [Microprocessor control system for diesel generator]. *Lokomotiv*, 3, 48-50. [in Russian].

13. Yepishin A.Yu. (2013). K voprosu povysheniya toplivnoy ekonomichnosti dizel'-generatorov teplovoznov v perekhodnykh rezhimakh upravleniya [On the issue of increasing the fuel efficiency of diesel generators of diesel locomotives in transient control modes]. *Yestestvennyye i tekhnicheskkiye nauki*, 1, 373-376. [in Russian].

14. Poyda A.M., Sivykh D.H., Karsekin R.M. (2001). Modelyuvannya perekhidnykh protsesiv teplovoznnoho dyzelya v ekspluatatsynomu tsykli z metoyu vstanovlennya shlyakhiv znyzhennya vytrat palyva [Modeling of transients of diesel locomotive in the operating cycle in order to establish ways to reduce fuel consumption N.-tekhn. Zvit] №0199U003102 [N.-tech. report №0199U003102],

Kharkiv: KharDAZT, 2001, no 96, pp. 5-6 [in Ukraine].

15. Bogayevskiy A.B. (2008). Kompyuternaya model moschnogo transportnogo dizel-generatora s elektronnoy sistemoy upravleniya [Computer model of a powerful transport diesel generator with an electronic control system]. *Otkryitiye informatsionnyie i kompyuternyye integralnyie tehnologii*, 38, 150–169. [in Russian].

16. Bogayevskiy A.B., Prokhorenko A.A. (2017). Modernizatsiya sistemy upravleniya podachey topliva teplovoznogo dizel-generatora [Modernization of the fuel supply control system for a diesel locomotive generator]. *Visnik NTU «KHPÍ»*, 1, 3-7. [in Russian].

17. Kir'yanov A.N. (2014). Effektivnost' raboty teplovozov s elektronnoy sistemoy upravleniya vpryskom topliva [Efficiency of diesel locomotives with electronic fuel injection control system]. *Lokomotiv*, 1, 34-37. [in Russian].

18. Zonov V.D., Matyash V. O., Belous Yu. A., Pol'nikov Yu.V. Levtsov V.B. (2021). Metodologiya izmereniya massy topliva apparatno-programmnyim kompleksom teplovoza [Methodology for measuring fuel mass by hardware and software complex of a diesel locomotive]. *Railway transport of Ukraine*, 3, 53-66. [in Russian].

19. Kalitsun V. I., Drozdov Ye. V., Komarov A. S., Chizhik K. I. (2002). *Osnovy gidravliki i aerodinamiki* [Fundamentals of hydraulics and aerodynamics]. Moscow : Stroyizdat. [in Russian].

20. Nakoryakov V.Ye., Vasserman Ye.S., Pokusayev B.G., Pribaturin N.A. (1994). Usileniye amplitudy voln davleniya v parozhidkostnoy srede puzyr'kovoy struktury [Strengthening the amplitude of pressure waves in a vapor-liquid medium of a bubble structure]. *Teplofizika vysokikh temperature*, 32 (3), 411–417. [in Russian].

UDC 004.94

DOI:10.34029/2311-4061-2022-142-1-45-50

**Research of artificial neural networks architectures efficiency for railways electric consumption forecast / O. Haidenko, H. Holub, I. Kulbovskiy, Yu.Shtompel // Railway Transport of Ukraine. – 2022. – № 1. – pp. 45-50.**

The change of the artificial neural network architecture as a potential way to increase its efficiency in the management of power supply to railways is considered at the article. Experimental research of the architectures and the configuration influence of an artificial neural network on the quality of its training is carried out. The Mean Squared Error criterion to assess the accuracy of the forecasting is used. The Bayesian regularization algorithm of neural network models learning task is used for regularization. The smaller value of the Mean Squared Error by manipulations with the architecture and configuration of the artificial neural network is obtained. A confrontation of the Feed-forward and NARX architectures for electricity consumption

forecast on the electrified railway section is conducted. They showed similar results. The NARX architecture proved to be more promising for practical application in the task of forecasting electricity consumption by railroad. As a result of an experimental research of the NARX configuration, a significant dependence of the model behavior on the number of neurons in the input layer is established.

**Keywords:** forecasting, neural network, Matlab, Neural Network Toolbox, railway, power consumption, NARX, Feed-forward.

#### References

1. Haidenko O. S., Holub H. M. (2018). Prohnozuvannya spozhytoi elektroenerhii metodamy nejmerezhevoho modeliuvannya [Electric power consumption forecasting by methods of neural network modeling]. *Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technologies. Series Transport Systems and Technologies*, 31, 196-201. [in Ukrainian].

2. Haidenko O. S., Holub H. M. (2018). Model of the control intellectual information system by railroad electrical power supply [Model of intelligent information system of railway power supply management]. *Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technologies. Series Transport Systems and Technologies*, 32 (2), 96-101. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2018-32-2-96-101> [in Ukrainian].

3. Haidenko O.S., Holub H.M. (2017). Kharakterni osoblyvosti modeliuvannya systemy ta protsesiv tiahovoho elektropostachannia zaliznytsi yak obiekta monitorynhu ta keruvannya [Characteristic features of simulation of the system and processes of railway traction power supply as a monitoring and control object]. *Modeling and Information Technologies: Collected papers*, 79, 42-48 [in Ukrainian].

4. Dharmendra Kumar Mishra, Dwivedi A. K. D., Tripathi S. P. (2012). Efficient algorithms for load forecasting in electric power system using artificial neural network. *International Journal of Latest Research in Science and Technology*, 1 (3), 254-258 [in English].

5. Lutchyn T. M. (2014). *Identyfikatsiia parametriv rezhymiv elektrospozhyvannia* [Identification of parameters of power consumption modes]. (thesis for a Doctor of Philosophy Ph.D). National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv. [in Ukrainian].

6. Makarov I. M., Lokhin V. M., Manko S. V. (2006) *Iskusstvennyi intellekt i intellektualnye sistemy upravleniia* [Artificial intelligence and intelligent control systems]. Moscow: Nauka [in Russian].

7. Medvedev V. S., Potemkin V. G. (2001). *Neironnye seti. MATLAB 6. Pakety prikladnykh programm*. [Neural networks. MATLAB 6. Packages of application programs, Book 4]. Moscow: Dialog-MEPHI [in Russian].

8. MacKay D. J. C. (1991). Bayesian interpolation. *Neural Computation*, 4, 415-447 [in English].
9. Markvardt K. G. (1982). *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* [Power supply of electrified railways]. Moscow: Transport [in Russian].
10. Mikhneieva H. P. (2011). Informatsiina tekhnolohiia obrobky informatsii v intelektualnii systemi keruvannia koordynatno-vymiriuvanoi mashyny [Information Processing Technology in the Intellectual Management System of Coordinate Measuring Machine]. *Actual problems automation and information technology*, 15, 130-141 [in Ukrainian].
11. Fletcher R., Reeves C. M. (1964). Function minimization by conjugate gradients. *Computer Journal*, 7 (2), 149-154. <https://doi.org/10.1093/comjnl/7.2.149> [in English].
12. Hagan M. T. Menhaj M. (1994). Training feedforward networks with the Marquardt algorithm. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 5 (6), 989-993. DOI: 10.1109/72.329697 [in English].

UDC 625.09

DOI: 10/34029/2311-4061-2022-142-1-51-54

**Istvan Zobori – scientist and organizer of science / S. Myamlin / Railway Transport of Ukraine. – 2022. – № 1. – pp. 51-54.**

At the beginning of this year, an outstanding mechanical scientist and organizer of international scientific conferences in the field of railway transport, honorary professor of the Budapest University of Technology and Economics, member of the international editorial board of the scientific and practical journal "Railway Transport of Ukraine", Doctor of Technical Sciences, Professor Istvan Zobory, passed away. Starting his career at the Budapest University of Technology and Economics in 1976, Istvan Zobory remained faithful to the traditions of university science to the end. In 1981 he defended the thesis of a candidate of technical sciences, and in 1993 he defended his thesis of a doctor of technical sciences. During his work at the university, he went from a teacher of the department to the head of the department and the dean of the faculty. During its history, the department and faculty have changed their name, but have always been associated with railway transport and engineering. Professor Istvan Zobory has always been distinguished by high decency, intelligence and humanity in relations with students, teachers and colleagues.

**Keywords:** Dr. Zobory István, mechanical scientist, longitudinal train dynamics, rolling stock dynamics, interaction between rolling stock and track.

#### References

1. Myamlin S., Blokhin E., Danovich V., Litvin V. (1994). Influence of railway vehicle models of detail on the results of wheel wear prediction. *Proceedings of the 2nd Mini Conference on "Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems"*.

Budapest, 1994 [in English].

2. Blokhin E., Evdomakha G., Zheleznov K., Myamlin S. (1996). Automational complex for studying train movement as a system and its utilization for drivers training in safe and economic method of movement. *Proceedings of the 1996 5th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies, Budapest, Hung., 11-13 Nov. 1996*, 251-253. Budapest, 1996. [in English].

3. Blokhin E., Danovich V., Myamlin S., Litvin V. (1996). Influence of railway vehicles models degree of detail on the results of wheel wear prediction. *Proceedings of the 2nd Mini Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, Budapest, 29-31 July 1996*, 297-303. Techn. Univ. of Budapest, 1996. [in English].

4. Myamlin S. (1998). Mathematical modelling of body connections in railway vehicles. *Proceedings of the 6th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies, 9-11 November 1998, Budapest, Hungary*. [in English].

5. Pshin'ko O. M., Blokhin Y. P., Myamlin S. V. (2000). Effect of the lengths of rail line horizontal and vertical irregularities on dynamic loading of open wagon. *Abstracts of the 7th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies, Budapest, 14. Budapest Univ. of Technology and Econ., 2000*. [in English].

6. Pshin'ko A., Blokhin Y., Myamlin S. (2000). The influence of the length of horizontal and vertical irregularities of railway track on dynamic loading of an open wagon. *Proceedings of the 7th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies, Budapest, 247-254. Budapest Univ. of Technology and Econ., 2000*. [in English].

7. Blokhin Y., Pshin'ko A., Myamlin S. (2001). Optimization of parameters of spring suspension of the freight car three-piece bogie. *Proceedings 5th International Conference on Railway Bogies and Running Gears, 263-271. Budapest, 2001*. [in English].

8. Blokhin Y., Pshin'ko A., Myamlin S. (2001). Peculiarities of dynamics of empty freight wagon. *Proceedings of the 8th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies, 11-13 November 2002, Budapest, Hungary, 167-174. Budapest Univ. of Technology and Econ. 2002*. [in English].

9. Pshin'ko O., Myamlin S., Yalovoy A., Rasporskiy V. (2004). Modernization of three-piece bogies. *Proceedings 6th International Conference on Railway Bogies and Running Gears, Budapest, 13-16 September, 2004, 175-180. Budapest, 2004*. [in English].

10. Pshin'ko O., Manashkin L., Myamlin S., Bodnar B., Pys'mennyy Y. (2004). On measuring vertical forces in freight car bogies. *Abstracts 9th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies, Budapest, 8-10 November, 2004, 11-12. Budapest Univ. of Technology and Econ., 2004*. [in English].

12. Pshin'ko O., Manashkin L., Myamlin S., Bodnar B., Pys'mennyy Y. (2004). On measuring vertical forces in freight car bogies. *Proceedings 9th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies, Budapest, 8–10 Nov, 2004*, 195–200. Budapest Univ. of Technology and Econ., 2004. [in English].