



ВЕСТНИК

Белорусского
Государственного
Университета
Транспорта

НАУКА
и ТРАНСПОРТ

1/2024



ВЕСТНИК
Белорусского
Государственного
Университета
Транспорта

Научно-практический журнал

НАУКА
и ТРАНСПОРТ

№ 1 (48)/2024

«ВЕСТНИК БелГУТа: НАУКА И ТРАНСПОРТ»

Научно-практический журнал № 1 (48) 2024 года

Издается с апреля 2000 года

Выходит один раз в полугодие

Учре д и т е л и:

Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта»
Министерство транспорта и коммуникаций Республики Беларусь

Главный редактор *Ю. И. КУЛАЖЕНКО*

Заместители главного редактора: *А. А. ЕРОФЕЕВ, А. О. ШИМАНОВСКИЙ*

Редакционная коллегия:

*А. А. СИВАК, В. М. МОРОЗОВ, В. Н. ШУБАДЕРОВ,
В. Я. НЕГРЕЙ, К. А. БОЧКОВ, Ю. О. ПАЗОЙСКИЙ, Э. И. СТАРОВОЙТОВ, О. Н. ЧИСЛОВ*

Ответственный секретарь *Т. А. ВЛАСЮК*

Адрес редакции: ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Республика Беларусь
Телефон (факс) (0232) 31-59-48

Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1247 от 08.02.2010,
выданное Министерством информации Республики Беларусь

На белорусском и русском языках

ВЕСТНИК БелГУТа: НАУКА И ТРАНСПОРТ

Научно-практический журнал

2024. № 1 (48)

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ

Комнатный Д. В. Методика зонирования для разработки микроэлектронной и микропроцессорной аппаратуры систем обеспечения безопасности движения поездов.....	4
Галушко В. Н., Ермоленко Д. В. Моделирование электромагнитных процессов при возникновении межвитковых замыканий в трехфазном асинхронном двигателе	7
Громыко И. Л., Пацкевич В. А. Моделирование электромагнитных процессов в однофазном трансформаторе при межвитковых замыканиях на основе Т-образной схемы замещения	11
Медведев Д. Д. Анализ искажений амплитудно-манипулированного сигнала контроля рельсовых линий.....	17
Мирош Д. В., Овчинников В. М., Монархович И. Е. Технология применения нейронных сетей для диагностики межвитковых замыканий в трансформаторах и асинхронных двигателях.....	24

АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

Аземша С. А. Повышение эффективности дорожного движения на площади Ленина г. Гомеля	30
-------------------------------------------------------------------------------------------	----

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ

Сахаров П. А. Продольная динамика однородных по массе поездов при движении через переломы профиля пути в режиме холостого хода	35
Отока А. Г., Мартышов А. С., Огородников Л. В., Холодилов О. В. Особенности вибрационного диагностирования подшипников качения колёсно-моторных блоков электропоездов серии ЭР9 при текущем ремонте.....	40

ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

Поддубный А. А., Дадалко В. А., Печенев Е. В. Расчет несущей способности элементов наплавного быстровозводимого моста грузоподъемностью 500 и 1000 кг с применением программного комплекса	47
Поддубный А. А., Демидович И. С. Применение гибких стержневых элементов для закрепления наплавных быстровозводимых мостов на участке их возведения	51
Васильев А. А., Кабышева Ю. К., Ткачева М. И., Агеева К. Э. Анализ предельной величины карбонизации для подвижных смесей бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12/15} - C^{50/60}$	54

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА

Бурченков В. В. Принятие решений по продлению сроков эксплуатации стрелочных электроприводов на основе методологии «УРРАН»	59
Михальченко А. А. Планирование погрузочных ресурсов железной дороги в новых геополитических условиях	64
Кекиш Н. А., Клешина Л. А., Леонова Ю. С., Немчевский В. С. Сравнительный анализ потенциала контейнеризации железнодорожных перевозок продукции промышленных предприятий отдельных регионов	70
Ковтун П. В., Осипова О. В., Биндюк С. А., Мусилович В. А., Радунцев М. Г. Актуальные вопросы замены стрелочных переводов на железнодорожных путях общего пользования	75
Ковтун П. В., Осипова О. В., Биндюк С. А., Кравченко Н. Н., Мусилович В. А. Перспективы развития системы введения путевого хозяйства.....	81
Сугоровский Ан. В., Кол С. Н., Сугоровский А. В., Крутиков Н. Д. Опыт и перспективы автоматизированного управления движением поездов	86
Ерофеев А. А. Анализ состояния и направления развития парка грузовых локомотивов Белорусской железной дороги.....	92

ПОДГОТОВКА КАДРОВ

Гегедеш М. Г. Возможности реализации принципов концепции педагогики удивления при подготовке специалистов транспортного комплекса.....	97
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ

УДК 656.25

Д. В. КОМНАТНЫЙ, кандидат технических наук Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого

МЕТОДИКА ЗОНИРОВАНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ И МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ АППАРАТУРЫ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

Рассматривается методика выбора мест размещения чувствительных к электромагнитным помехам узлов в корпусе аппаратуры систем обеспечения безопасности движения поездов (зонирования). Предлагаются количественные параметры элементарных объемов, опасных зон и конструкций корпусов с позиций выявления в корпусе опасных зон. Эти параметры определяются на основании анализа распределения энергии электромагнитного поля по элементарным объемам внутри корпуса. Рассмотрены способы вычисления энергии электромагнитного поля в элементарных объемах при расчете во временной и частотной областях. В совокупности, предлагаемая методика зонирования с использованием количественных параметров для опасных зон снижает вероятность ошибки при разработке оборудования. Следовательно, она позволяет повысить помехоустойчивость аппаратуры систем обеспечения безопасности движения поездов.

Одним из способов снижения воздействия электромагнитных помех на микроэлектронную и микропроцессорную аппаратуру является зонирование [1]. Сущность его заключается в размещении узлов с чувствительной элементной базой в местах с низким уровнем помехового электромагнитного поля внутри корпуса.

Таким образом, задача зонирования является частным случаем проблемы оптимального синтеза технических систем, содержащих источники физических полей. Такие источники порождают в системах физические процессы, которые могут негативно сказаться на качестве функционирования системы. Решению этой проблемы посвящены работы [2, 3]. Но в этих работах рассмотрены, главным образом, вопросы внутриаппартурного синтеза. Кроме того, проблема оптимального синтеза решена для сравнительно простых механических систем – пластин с опорами – и для теплотехнических систем.

В задачах электромагнитной совместимости (ЭМС) рассматриваются источники электромагнитных некондуктивных помех, расположенные вне корпуса микропроцессорной аппаратуры и, зачастую, на значительном удалении от него. Поэтому, по сравнению с указанными выше системами, в области ЭМС возникают дополнительные трудности. Во-первых, зачастую нельзя распорядиться местоположением источников мощных некондуктивных помех (мощные радиоизлучатели, генераторы преднамеренных электромагнитных воздействий, линии электропередач). Во-вторых, система рецепторов состоит из крайне сложной конфигурации паразитных антенн, описание которых современными средствами является практически невозможным [4].

Поэтому задача зонирования решается в приближенной постановке. Опасные зоны в корпусе технического средства определяются на основании расчета распределения помехового электромагнитного поля. В качестве вспомогательного средства используется

визуализация картины поля, к счастью, современные средства компьютерной математики позволяют осуществить ее с малыми затратами времени (рисунок 1).

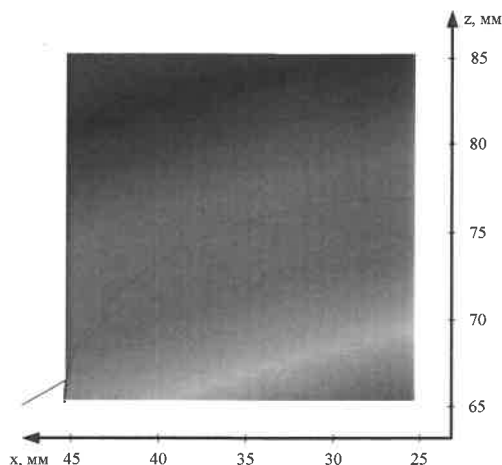


Рисунок 1 – Пример выделения опасной зоны с помощью компьютерной визуализации

Из-за неразработанности теоретического подхода осуществление зонирования практически не рассматривается в руководствах по проектированию микроэлектронной аппаратуры [1, 5, 6]. Процедура зонирования остается полукачественной и, во многом, эмпирической. Такое положение недопустимо при проектировании систем обеспечения безопасности движения поездов (СОБД), для которых имеется неразрывная связь между безопасностью и ЭМС [7].

Поэтому в статье поставлена цель разработки методики зонирования, в которой выделение зон осуществляется на основе анализа помехонесущего электромагнитного поля в корпусе рецептора, выделенные на рисунке 1 зоны характеризуются количественными параметрами, количественными параметрами характеризуется, в частности, конструкция корпуса аппаратуры СОБД и распределение в ней опасных зон.

Задача зонирования в статье ставится следующим образом. Дана конструкция, размеры корпуса микроэлектронной аппаратуры СОБД, а также размеры всех паразитных антенн на корпусе. К таким антеннам относятся отверстия, щели, винтовые соединения. Последние образуют штырьки внутри корпуса. Заданы источники электромагнитных помех, проникающих внутрь корпуса через паразитные антенны и распространяющихся в нем по воздуху. Требуется выделить внутри корпуса зоны, в которых уровень электромагнитных помех превышает допустимый для используемой в узлах аппаратуры СОБД элементной базы.

Для решения поставленной задачи объем корпуса разбивается на элементарные объемные ячейки (элементарные объемы), размеры которых незначительно превосходят характерные размеры элементной базы. Основной характеристикой электромагнитных помех целесообразно выбрать энергию электромагнитного поля. Это объясняется тем, что уровни энергии помех, необходимой для повреждения линий связи печатных узлов и элементной базы, имеют пренебрежимо малые разбросы относительно известных средних значений [1].

Элементарный объем рационально характеризовать относительной повреждающей энергией

$$\psi^i = \frac{W_V}{W_d}, \quad (1)$$

где W_V – энергия электромагнитного поля в элементарном объеме, Дж; W_d – энергия повреждения элементной базы, Дж.

Опасные зоны образуются смежными элементарными объемами, для которых $\psi^i \geq 1$. По принципу наихудших условий предполагается, что рецептор узла поглощает большую часть (до 80–90 %) энергии помех, находящейся в элементарных объемах. Таким образом, опасность размещения в зоне соответствующих элементов определяется энергией помехового электромагнитного поля в зоне и пороговой энергией повреждения элементной базы.

Конструкция корпуса аппаратуры СОБД с позиции распределения в нем опасных зон и решения задачи зонирования может оцениваться показателями потенциально опасного объема и повреждаемости. В задачах ЭМС повреждаемость целесообразно принять за интегральный показатель, характеризующий свойства корпуса по расположению в нем опасных зон.

$$V_{\text{оп}} = \sum 1(\psi^i - 1) V^i, \quad (2)$$

$$Y = \sum \psi^i 1(\psi^i - 1) V^i, \quad (3)$$

где 1 – единичная функция; $V_{\text{оп}}$ – потенциально опасный объем, м³; V^i – величина элементарного объема, м³; Y – повреждаемость, м³.

Перечисленные характеристики элементарных объемов, зон и корпуса первоначально введены в механике износоусталостного повреждения [8]. Основанием для переноса этого подхода на электромагнитные поля является положение о том, что электромаг-

нитное поле может рассматриваться как разновидность сплошной среды. Это положение обосновано академиком Л. И. Седовым в [9].

Из (1)–(3) следует, что для определения относительной повреждающей энергии необходимо рассчитать энергию электромагнитного поля, содержащуюся в элементарном объеме. Однако в имеющейся литературе вопросы расчета энергии рассмотрены в [10] только для электротехнических устройств. В большинстве источников [11–13] вопрос об энергии электромагнитного поля рассматривается с теоретических позиций.

Тем не менее указанные источники позволяют выбрать способы расчета энергии электромагнитного поля в зависимости от того, во временной или частотной области рассчитывается электромагнитное поле.

Для решения задачи зонирования наиболее удобны численные методы с дискретизацией объема: метод конечных элементов, который реализован в известном программном продукте ANSYS [14, 15], и метод ячеек Йии, реализованный в продукте Microwave Studio [16]. Это объясняется тем, что соответствующие дискретные объекты расчетного метода естественным способом образуют разбиение объема корпуса на элементарные объемы.

В этих методах расчет ведется во временной области. Тогда энергия электромагнитного поля в элементарном объеме может быть найдена из выражения [13]

$$W_V = \left[\frac{1}{2} (\epsilon E^2(t) + \mu H^2(t)) \right] V^i, \quad (4)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость среды, Ф/м; E – напряженность электрического поля, В/м; μ – магнитная проницаемость среды, Гн/м; H – напряженность магнитного поля, А/м; t – время, с.

В случае импульсных помех электрическая и магнитная составляющие поля непрерывно меняются во времени, поэтому следует выбирать максимальное значение энергии электромагнитного поля за характерное время воздействия помехи.

Несмотря на достигнутый высокий уровень развития численных методов, аналитические методы расчета электромагнитных полей сохраняют актуальность при решении задач ЭМС. Это объясняется тем, что аналитические методы отличаются сравнительно несложным математическим аппаратом, вычислительной эффективностью, простотой реализации, отсутствием вычислительных трудностей, быстротой получения результата. Один из таких методов предложен в [17]. Результатом расчета в нем являются составляющие вектора напряженности помехового электромагнитного поля в декартовой системе координат и в частотной области. В этом случае можно рекомендовать рассчитывать энергию помех в элементарном объеме по формуле

$$W_V = \frac{w_x S_x}{2} + \frac{w_y S_y}{2} + \frac{w_z S_z}{2}, \quad (5)$$

где w_x, w_y, w_z – поток энергии электромагнитного поля по осям x, y, z соответственно, Дж/м²; S_x, S_y, S_z – площади граней элементарного объема м².

Указанные грани показаны на рисунке 2.

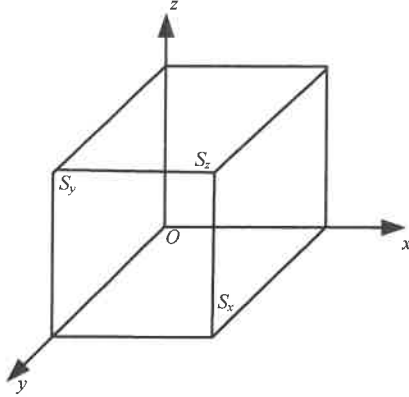


Рисунок 2 – Элементарный объем с гранями для расчета потока энергии электромагнитного поля

Плотность потока энергии по оси $q \in x, y, z$ рассчитывается по формуле [14]

$$w_q = \frac{1}{2Z_0} \int_0^{\infty} E_q^2(\omega) d\omega, \quad (6)$$

где Z_0 – импеданс свободного пространства, Ом; E_q – составляющая вектора напряженности электромагнитного поля по соответствующей оси, В/м, ω – круговая частота, рад/с,

Предложенная методика зонирования при выборе компоновки микроэлектронной и микропроцессорной аппаратуры СОБД основана на анализе распределения помехового электромагнитного поля в корпусе аппаратуры. Зоны образуются элементарными объемами, которые характеризуются энергией электромагнитного поля в объеме и относительной повреждающей энергией. Таким образом, выделенные опасные зоны имеют количественные параметры. Использование этих параметров снижает вероятность ошибки и влияние человеческого фактора. Расположение узлов аппаратуры СОБД в безопасных зонах внутри корпуса повышает ее помехоустойчивость без использования дополнительных средств защиты. Если же без использования таких средств обойтись не удастся, то их выбор и размещение обосновывается расчетами электромагнитных помех внутри корпуса. Так достигается экономия средств на изготовление аппаратуры СОБД не в ущерб ее помехоустойчивости.

Следовательно, предложенная методика зонирования может найти применение в практике разработки современных СОБД на железнодорожном транспорте.

Получено 10.02.2024

D. V. Komnatny. Procedure of zoning during development of microelectronic and microprocessor equipment of train safety control systems on railway transport.

The procedure of placement selection for units, sensitive to electromagnetic noise, in the case of train safety control systems equipment (zoning) is considered. The quantitative parameters for elementary volumes in the case, the dangerous zone and cases design are defined based on analysis of electromagnetic field energy distribution in elementary volumes inside the case. The methods of electromagnetic field energy calculations allow elementary volumes during the calculations in time or frequency domain are discussed. In common, the proposed procedure of zoning using the quantitative parameters for dangerous zones can reduce the mistake probability during the equipment development. Such this procedure allows to raise noise immunity of train safety control systems.

Автор выражает искреннюю благодарность магистру техн. наук И. О. Жегалину за большую помощь в создании рисунков к статье.

Список литературы

- 1 **Кравченко, В. И.** Грозозащита радиоэлектронных средств / В. И. Кравченко. – М. : Радио и связь, 1991. – 264 с.
- 2 **Стоян, Ю. Г.** Размещение источников физических полей / Ю. Г. Стоян, В. П. Путятин. – К. : Наукова думка, 1989. – 184 с.
- 3 **Стоян, Ю. Г.** Оптимизация технических систем с источниками физических полей / Ю. Г. Стоян, В. П. Путятин. – К : Наукова думка, 1988. – 192 с.
- 4 **Прищепенко, А. Б.** Взрывы и волны. Взрывные источники электромагнитного излучения радиочастотного диапазона / А. Б. Прищепенко. – М. : БИНОМ Лаборатория знаний, 2008. – 207 с.
- 5 **Князев, А. Д.** Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной техники с учетом электромагнитной совместимости / А. Д. Князев, Л. Н. Кечиев, Б. В. Петров. – М. : Радио и связь, 1989. – 224 с.
- 6 **Барнс, Дж.** Электронное конструирование. Методы борьбы с помехами / Дж. Барнс. – М. : Мир, 1990. – 238 с.
- 7 **Кечиев, Л. Н.** Электромагнитная несовместимость: опасности, катастрофы, риски / Л. Н. Кечиев. – М. : Грифон, 2022. – 344 с.
- 8 **Щербakov, С. С.** Новая модель износа / С. С. Щербakov, Л. А. Сосновский // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2020. – № 1. – С. 74–82.
- 9 **Седов, Л. И.** Механика сплошной среды : в 2 т. Т. 1 / Л. И. Седов. – М. : Наука, 1970. – 492 с.
- 10 **Брон, О. Б.** Электромагнитное поле как вид материи / О. Б. Брон. – М. – Л. : Госэнергоиздат, 1962. – 260 с.
- 11 **Поливанов, К. М.** Теоретические основы электротехники : в 3 ч. / К. М. Поливанов. – М. : Энергия, 1969. – Ч. 3 : Теория электромагнитного поля. – 352 с.
- 12 **Фальковский, О. И.** Техническая электродинамика / О. И. Фальковский. – М. : Связь, 1978. – 472 с.
- 13 **Ерофеевко, В. Т.** Аналитическое моделирование в электродинамике / В. Т. Ерофеевко, И. С. Козловская. – М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2014. – 304 с.
- 14 **Каплун, А. Б.** ANSYS в руках инженера. Практическое руководство / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Шахраева. – М. : URSS. – 2021. – 272 с.
- 15 **Кулон, Ж.-Л.** САПР в электротехнике / Ж.-Л. Кулон, Ж. К. Сабоннадьер. – М. : Мир, 1988. – 204 с.
- 16 **Курушин, А. А.** Проектирование СВЧ-устройств в среде GST Microwave Studio / А. А. Курушин, А. Н. Пластиков. – М. : Издательство МЭИ, 2011. – 155 с.
- 17 **Бочков, К. А.** Элементы моделирования электромагнитной совместимости устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / К. А. Бочков, Д. В. Комнатный. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 185 с.

УДК 681.5

В. Н. ГАЛУШКО, кандидат технических наук, Д. В. ЕРМОЛЕНКО, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ МЕЖВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В ТРЕХФАЗНОМ АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ

Материал данной статьи связан с математическим описанием электромагнитных процессов, происходящих при межвитковых замыканиях в трехфазных асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором. На основании экспериментальных исследований рассчитываются параметры Т-образной схемы замещения. Предложена технология определения межвитковых замыканий, основанная на графическом отношении токов холостого хода. Данная разработка достаточно просто адаптируется под диагностику трехфазных асинхронных двигателей различных мощностей и исполнения.

Асинхронные двигатели (АД) обладают неоспоримыми достоинствами: надежность в эксплуатации; относительно высокий КПД при номинальной нагрузке; способность выдерживать механические перегрузки и относительно невысокая стоимость обслуживания и ремонта. В железнодорожной отрасли АД массово используются в качестве тяговых (БКГ1, БКГ2, ВЛ80С, Stadler) и вспомогательных приводов электропоездов, стрелочных переводов, приводов множества станков в локомотивных и вагонных депо, системах водоснабжения, вентиляции и электроснабжения.

Многие из АД могли бы эксплуатироваться еще длительное время при диагностировании неисправностей на ранней стадии. При комплексном подходе некоторые факторы и параметры следует рассматривать при их взаимном влиянии на работоспособность АД. В этом случае повышается достоверность диагностирования и уменьшается численное значение аварийных отказов.

Применительно к АД отказы можно подразделить на электрические и механические. К электрическим относятся те, которые происходят по причине пробоя изоляции на корпус или между фазами, обрыва проводников в обмотке, замыкания между витками обмоток, нарушение или ослабление контактов в клеммной коробке, снижения сопротивления изоляции ниже допустимого вследствие ее старения или увлажнения. К механическим можно отнести разрушения различного рода в подшипниковых узлах, деформацию вала ротора, ослабление или обрыв бандажей, снижение качества охлаждения из-за загрязнения охлаждающих каналов или корпуса.

В связи с массовым применением АД актуальной задачей видится создание системы диагностики, позволяющей выявить дефекты на ранней стадии обнару-

жения. Это позволит обеспечить сохранность оборудования, избежать внеплановых ремонтов, а также временных задержек в производственном и транспортно-технологическом процессе.

Методы диагностики АД (в том числе и по межвитковым замыканиям) достаточно подробно освещены в [1], где, однако, указывается необходимость использования Фурье-анализа для распределения видов повреждений. Также исчерпывающий подбор по вопросам диагностики в АД приведен в [2].

Полученные статистические результаты на Белорусской железной дороге [3] указывают на значимость анализа таких отказов, как межвитковые замыкания (МВЗ) (27 %) и работу подшипникового узла. Исследование процессов, происходящих при возникновении МВЗ, предпринимались многими отечественными и зарубежными авторами. Например, в [4] на модели, построенной с помощью программного обеспечения MatLab/Si-mulink с помощью библиотеки блоков SimPowerSystem. В источнике [5] указано, что количество неисправностей, приходящихся на МВЗ, достигает 78 % от всех неисправностей АД, а в работе [6] – на долю МВЗ приходится 93 %.

Математическое описание процессов, происходящих при МВЗ в АД с короткозамкнутым ротором (КЗР), основанное на экспериментальных исследованиях и построении адекватной аналитической модели, позволит в дальнейшем с большей вероятностью на основе разработанных приборов распознать негативные процессы на ранних стадиях возникновения МВЗ. За основу для расчета рабочих характеристик АД с КЗР в установившемся режиме холостого хода удобно взять его упрощенную математическую модель, которая основана на Т-образной схеме замещения (рисунок 1).

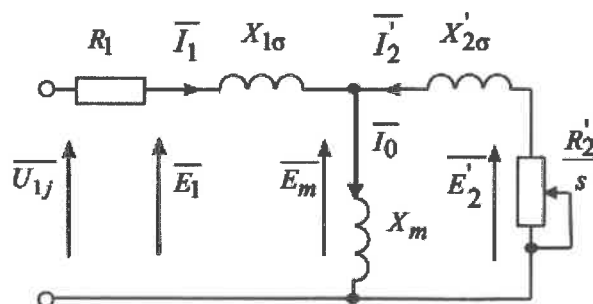


Рисунок 1 – Т-образная схема замещения фазы АД

На рисунке 1 приняты следующие обозначения: U_{1j} – фазное напряжение обмотки статора; R_1 и R'_2 – активные сопротивления обмотки статора и ротора, приведенные к обмотке статора; $X_{1\sigma}$ и $X'_{2\sigma}$ – индуктивные сопротивления рассеяния обмотки статора и ротора, приведенной к обмотке статора; I_1 – ток обмотки статора; \underline{E}_1 и \underline{E}'_2 – ЭДС обмотки статора и ротора, приведенная к обмотке статора; s – скольжение; E_m – ЭДС от главного магнитного потока машины.

Основные уравнения АД для Т-образной схемы замещения имеют следующий вид:

$$\underline{U}_{12j} = \underline{E}_m - jX_{1\sigma}I_1 - R_1I_1;$$

$$\underline{E}_m + jI'_2X'_{2\sigma} + I'_2\frac{R'_2}{s} = 0;$$

$$I_1 + I'_2 - I_0 = 0.$$

Ток ротора I'_2 , приведенный к обмотке статора АД, из схемы замещения определяется по формуле

$$I'_2 = \frac{U_{1j}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2}}$$

где $X_{\text{кн}} = X_1 + X'_2$ – индуктивное сопротивление короткого замыкания.

Ток статора I_1 определяется путем сложения вектора тока намагничивания I_0 и вектора тока ротора I_2 :

$$I_1 = I_0 + I_2.$$

Принимая во внимание, что ток намагничивания является реактивным, получим

$$I'_2 = \sqrt{I_0^2 + I_2^2 + 2I_0I_2 \sin \psi_2};$$

$$\sin \psi_2 = \frac{X_{\text{кн}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2}}.$$

Электромагнитный момент рассчитываем по формуле

$$M_j = \frac{m_1 U_{1j}^2 R'_2}{\omega_0 s \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2 \right]},$$

где ω_0 – синхронная угловая скорость; m_1 – число фаз статора (в нашем случае $m_1 = 3$).

В результате расчетов, получаем зависимости n_2 , s , M_2 , I_1 , $\cos \phi_1$, η и P_1 от P_2 при $U_1 = \text{const}$ и $f_1 = \text{const}$.

Аналитическую модель дополняет расчет токов для различных способов подключения АД с КЗР к трехфазной сети: звездой с нейтральным проводом, звездой с изолированной нейтралью; треугольником. Расчетные формулы широко известны и приведены ниже.

1 Схема подключения обмоток – «звезда с нейтральным проводом».

Так как в схеме есть нейтральный провод, то напряжение на фазах нагрузки равно соответствующему фазному напряжению источника питания:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A = U_\phi, \underline{U}_b = \underline{U}_B = U_\phi e^{-j120^\circ}, \underline{U}_c = \underline{U}_C = U_\phi e^{j120^\circ}.$$

Токи в линейных проводах (фазные токи) определяем с помощью закона Ома через эквивалентное полное сопротивление фаз АД:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_a = \underline{U}_a / \underline{z}_a, \underline{I}_B = \underline{I}_b = \underline{U}_b / \underline{z}_b, \underline{I}_C = \underline{I}_c = \underline{U}_c / \underline{z}_c.$$

Ток в нейтральном проводе находим по первому закону Кирхгофа

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C.$$

2 Схема подключения обмоток – «звезда с изолированной нейтралью».

Для определения фазных напряжений при несимметричной нагрузке, соединенной звездой без нейтрального провода, используют метод двух узлов. В соответствии с этим методом расчет начинают с определения напряжения U_N между нейтральными точками источника питания и нагрузки, называемого напряжением смещения нейтрали:

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{U}_A y_a + \underline{U}_B y_b + \underline{U}_C y_c}{y_a + y_b + y_c},$$

где y_a , y_b , y_c – полные проводимости соответствующих фаз нагрузки в комплексной форме, $y_a = 1/\underline{z}_a$, $y_b = 1/\underline{z}_b$, $y_c = 1/\underline{z}_c$.

Напряжения на фазах несимметричной нагрузки находят из выражений

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_N; \underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_N; \underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_N.$$

Фазные токи в нагрузке, они же токи линейных проводов при любом характере нагрузки,

$$\underline{I}_A = \underline{I}_a = \underline{U}_a / \underline{z}_a; \underline{I}_B = \underline{I}_b = \underline{U}_b / \underline{z}_b; \underline{I}_C = \underline{I}_c = \underline{U}_c / \underline{z}_c.$$

3 Схема подключения обмоток – «треугольник».

Фазные токи в нагрузке определяют с помощью закона Ома для участка цепи $\underline{I}_\phi = \underline{U}_\phi / \underline{z}_\phi$, где U_ϕ – соответствующее линейное напряжение источника питания; z_ϕ – полное сопротивление соответствующей фазы нагрузки. Токи в линейных проводах определяют через фазные на основании первого закона Кирхгофа для каждого узла:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}; \underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}; \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}.$$

Основные положения при аналитическом расчете сопротивлений обмоток при МКЗ.

Определение активных и индуктивных сопротивлений статора и ротора. Активные сопротивления рассчитывают для температуры 200 °С, а при определении потерь их приводят к стандартной рабочей температуре по ГОСТ 183, как указано в [7], путем умножения их на коэффициент.

При расчете индуктивных сопротивлений полей рассеяния ($X_{1\sigma}$) условно разбивают на три составляющие: пазовое, дифференциальное и лобовых частей обмоток. Без МКЗ для каждой составляющей определяем магнитную проводимость ($\lambda_{\text{п}}$; $\lambda_{\text{д}}$; $\lambda_{\text{л}}$); суммируем эти проводимости и по ним рассчитываем индуктивное сопротивление.

Проводимость пазового рассеяния зависит от формы и размеров паза. Проводимость дифференциального рассеяния обусловлена высшими гармониками. Высшие гармоники поля статора наводят токи в обмотке ротора. Скос пазов уменьшает демпфирующую реакцию токов. Этот параметр при МКЗ можно учитывать косвенно на основании эмпирических связей путем выполнения гармонического анализа с помощью цифрового осциллографа.

Проводимость рассеяния лобовых частей обмотки зависит от количества пазов на полюс и фазу, длины лобовой части катушки и от укорочения шага обмотки.

Кроме того, при пуске, а также в двигательном режиме работы от $s = 1$ до s_{\max} (соответствующем M_{\max}), следует учитывать явление насыщения путем потоков рассеяния, которое зависит от величины токов, протекающих в пазах, и уменьшает индуктивные сопротивления статора и ротора. Таким образом, разным режимам работы двигателя: номинальному, пусковому и максимальному – соответствуют различные значения сопротивлений в схеме замещения. Поэтому в нашем исследовании выполняем расчеты для режима холостого хода.

При МВЗ уменьшается число витков, увеличивается рассеяние магнитных потоков, растет температура в месте неисправности. Ниже приведены формулы для определения активных и индуктивных сопротивлений обмоток при температуре 20 °С и без учета влияния явлений вытеснения тока в обмотке короткозамкнутого ротора и насыщения путей потоков рассеяния статора и ротора. При МКЗ насыщение происходит, что также требует учета этого фактора.

Активное сопротивление обмотки статора

$$R_1 = w_1 l_{\text{ср1}} / (\rho_{\text{м20}} a_1 c S \cdot 10^3),$$

где w_1 – количество витков в обмотке фазы; $l_{\text{ср1}}$ – средняя длина витка обмотки; $b_{\text{ср1}}$ – средняя ширина катушки обмотки статора; $\rho_{\text{м20}} = 57$ См/мкм – удельная электрическая проводимость меди при 20 °С; a_1 – количество параллельных ветвей обмотки статора; c – количество элементарных проводов в эффективном; S – площадь поперечного сечения.

Индуктивное сопротивление обмотки фазы статора

$$X_{1\sigma} = 1,58 f_1 l_1 \omega_1^2 \lambda_1 / (p q_1 \cdot 10^8),$$

где l_1 – длина сердечника статора; λ_1 – коэффициент проводимости рассеяния поля статора; q_1 – количество пазов на полюс и фазу.

Сопротивление обмотки короткозамкнутого ротора, например, с овальными полузакрытыми и закрытыми пазами.

Активное сопротивление стержня клетки при 20 °С

$$R_2' = l_2 / (\rho_{\text{а20}} s_{\text{ст}} \cdot 10^3),$$

где $\rho_{\text{а20}}$ – удельная электрическая проводимость алюминия при 20 °С, $\rho_{\text{а20}} = 27$ См / мкм; l_2 – длина сердечника ротора.

Индуктивное сопротивление обмотки ротора, Ом,

$$X_{2\sigma}' = 7,9 f_2 l_2 \lambda_2 \cdot 10^{-9},$$

λ_2 – коэффициент проводимости рассеяния обмотки ротора.

Реактивное сопротивления намагничивающего контура (X_m) при МКЗ определяем на основе эмпирически полученных зависимостей $\Psi(I_0)$ для режима холостого хода АД.

Для получения исходных данных при МВЗ в качестве испытуемых электродвигателей были использованы несколько трехфазных АД мощностью от 0,12 до 1,7 кВт с однослойной всыпной обмоткой, класс изоляции – В. В расчетах использовались паспортные данные АД, измеряемые линейные токи, потребление

активной мощности P , $\cos\phi$, температура окружающей среды и в зоне МВЗ, данные RLC-метров. Искусственно были созданы повреждения изоляции для различного числа витков. Выполнялось контролируемое управление режимами МКЗ (включение, отключение, переключение на различное число витков) осуществлялось с помощью реле, закрепленного на подшипниковой крышке.

Авторами было предложено для определения МВЗ при непрерывном контроле токов на холостом ходу АД использовать отношения токов I_A/I_B , I_A/I_C , I_C/I_B при контроле сетевого напряжения. Программное обеспечение на компьютере импортирует полученные исходные данные в графическом виде для дальнейшей обработки в сверточные нейронные сети. Обучающая выборка должна включать достаточно большой массив данных. В нашем случае из всех результатов 80 % используется для обучения. Использование графических изображений позволяет унифицировать исследования для АД различных мощностей и легко адаптировать под различное исполнение. В данном исследовании разработанная авторами сверточная ИНС реализована в библиотеке Tensor Flow для языка Python 3.10 и частично рассмотрена в статье [8].

По результатам экспериментов при МВЗ определялись изменения активных и индуктивных сопротивлений. Затем с помощью аналитической модели рассчитывались действующие значения токов, которые сравнивались с результатами экспериментальных измерений. Полученное среднее отклонение результатов модели и экспериментов составило менее 5 %.

На основании экспериментов и результатов моделирования был составлен обобщенный алгоритм контроля токов определения МВЗ при различных схемах подключения обмоток.

1 Схема подключения обмоток – «звезда с нейтральным проводом»: увеличивалось отношение фазного тока по отношению к двум оставшимся фазным токам.

2 Схема подключения обмоток – «звезда с изолированной нейтралью»: увеличение двух фазных токов (для однослойной всыпной обмотки), одним из которых является ток в поврежденной обмотке, и снижение оставшегося, при неизменном линейном напряжении во время измерений.

Например, для АД 1,5 кВт (50 проводников в фазе) при закороченном 21 витке увеличение тока составляло более 2 % номинального (рисунок 2).

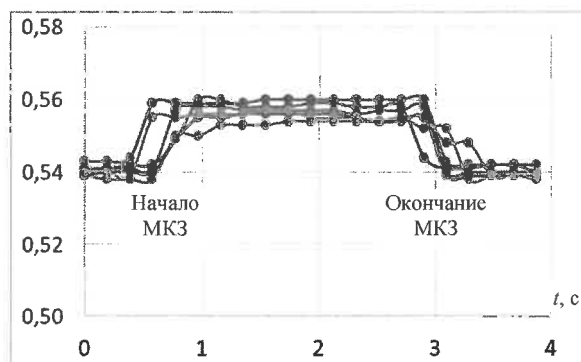


Рисунок 2 – Пример увеличения тока в поврежденной обмотке АД при МВЗ

3 Схема подключения обмоток – «треугольник»: увеличение отношений линейного тока по отношению к двум оставшимся линейным токам.

С ростом числа короткозамкнутых витков отношение линейных токов увеличивается.

Также авторами был применен способ исследования механических, электрических и тепловых 3D-параметров АД с КЗР с помощью программы Ansys и библиоте-

ки к ней. Исходными данными являлись помимо паспортных параметров еще и результаты расчета описанной аналитической модели в программе Mathcad.

Пример полученной анимации электромагнитных процессов АД представлен на рисунке 3 в виде характеристик электромагнитного поля с цветовой дифференциацией различных физических величин или в виде векторов.

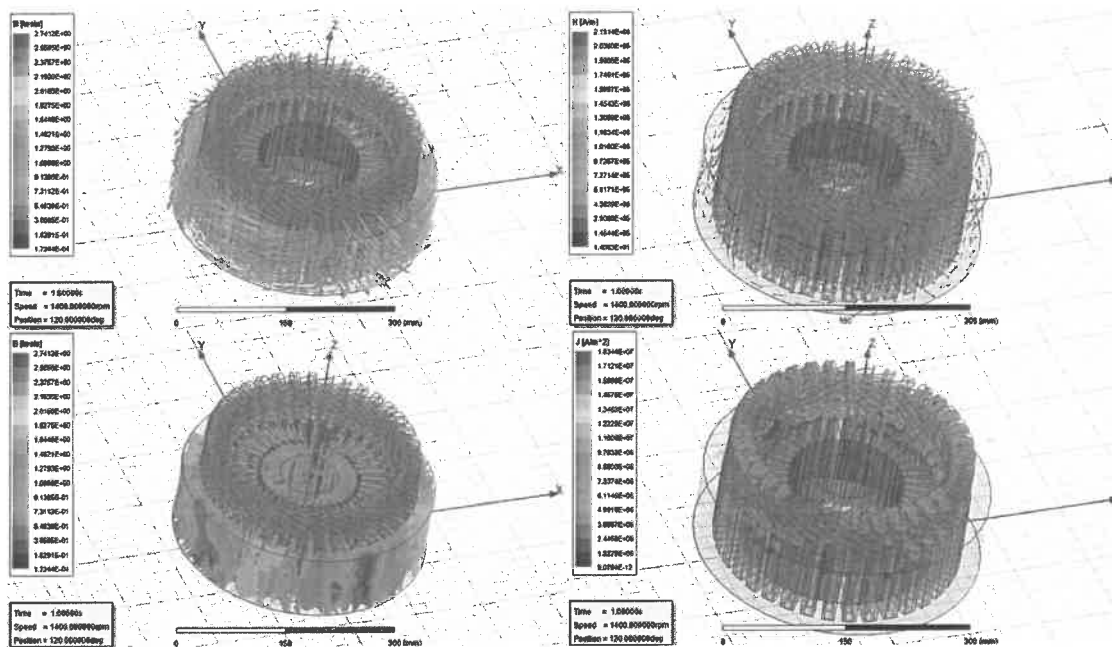


Рисунок 3 – Анализ 3D-модели различных полей Ansys Electronics

Понимание процессов, происходящих при межвитковых замыканиях в трехфазных асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором, с помощью аналитической модели, основанной на экспериментальных исследованиях позволит с большей вероятностью распознавать МВЗ электромагнитные процессы на ранних стадиях возникновения. Технология, основанная на непрерывном контроле отношений токов для холостого хода, позволяет унифицировать исследования для АД с КЗР различных мощностей и легко адаптировать под различное исполнение.

Список литературы

1 Дайнеко, В. А. Методы диагностики асинхронных электродвигателей в рабочих режимах и перспективы их применения / В. А. Дайнеко, Ж. Г. Юрковец // Агропанорама. – 2021. – № 4 (146). – С. 22–25.

2 Condition of induction motor: A review / R. N. Dash [et al.] // International conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System. – Odisha, 2016. – P. 2006–2011.

3 Мирош, Д. В. Анализ неисправностей асинхронных двигателей железнодорожной отрасли и их диагностика на

базе искусственного интеллекта / Д. В. Мирош, В. Н. Галушко, И. Л. Громыко // Энергоэффективность. – 2023. – № 4 (306). – С. 30–32.

4 Солодкий, Е. М. Диагностика межвиткового замыкания обмотки статора асинхронного двигателя на основе анализа траектории вращения вектора тока статора / Е. М. Солодкий, С. В. Сальников, Д. А. Даденков // Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 34. – С. 114–127.

5 Bonnett, A. H. Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors / A. H. Bonnett, J. C. Soukup // IEEE Trans. Industry Applications. – 1992. – Vol. 28, no. 4. – P. 921–937.

6 Воробьев, В. Е. Прогнозирование срока службы электрических машин : письменные лекции / В. Е. Воробьев, В. Я. Кучер. – СПб. : СЗТУ. – 2004. – 56 с.

7 Гольдберг, О. Д. Проектирование электрических машин : учеб. для вузов / О. Д. Гольдберг ; под ред. О. Д. Гольдберга. – М. : Высш. шк., 1984. – 431 с.

8 Громыко, И. Л. Диагностический комплекс трансформаторов и его применение с помощью сверточных нейронных сетей / И. Л. Громыко, В. О. Белькин, В. Н. Галушко // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2022. – № 2 (45). – С. 92–96.

Получено 27.02.2024

V. N. Galushko, D. V. Ermolenko. Modeling of electromagnetic processes when operation of interturn failures in a three-phase induction motor.

The material in this article is related to the mathematical description of electromagnetic processes occurring during interturn short circuits in three-phase asynchronous motors with a squirrel-cage rotor. Based on experimental studies, the parameters of the T-shaped equivalent circuit are calculated. A technology for determining interturn short circuits is proposed, based on the graphical relationship of no-load currents. This development is quite easily adapted to the diagnosis of three-phase asynchronous motors of various powers and designs.

УДК 621.3

И. Л. ГРОМЫКО, магистр технических наук, В. А. ПАЦКЕВИЧ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОДНОФАЗНОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ ПРИ МЕЖВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ОСНОВЕ Т-ОБРАЗНОЙ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

Описана технология определения межвитковых замыканий, основанная на экспериментальном определении параметров схемы замещения однофазных трансформаторов при межвитковых замыканиях. Разработанный математический инструментарий на основе схемы замещения при межвитковых замыканиях позволит получать модельным способом выборки для обучения сверточных нейронных сетей, унифицировать исследования для трансформаторов различных мощностей и легко адаптировать их под различное конструктивное исполнение. Полученная математическая модель на основе схемы замещения при межвитковых замыканиях позволяет с помощью моделирования создавать выборки для обучения сверточных нейронных сетей.

Экономическая ситуация в электроэнергетике вынуждает нас принимать меры, направленные на увеличение срока службы оборудования. Решение проблемы оценки технического состояния электрооборудования в электрических сетях во многом связано с внедрением эффективных методов инструментального контроля и технической диагностики, что в целом повышает энергоэффективность отрасли.

Основными задачами исследования являются:

- диагностика на ранних стадиях развития неисправностей и их классификация с одновременной локализацией;
- разработка математических, имитационных и нейронных моделей для обучения и выбора параметров защиты новых трансформаторов;
- разработка множественной регрессии и нейронных моделей для оценки остаточного ресурса на основе анализа экспериментов.

Неотъемлемым элементом электроснабжения является трансформатор. Выход из строя силового трансформатора может привести к аварийным ситуациям, отключению электроэнергии, массовому недопроизводству, сопровождающемуся значительным экономическим и экологическим ущербом. Поэтому контроль состояния трансформаторов является важной задачей.

Сегодня диагностика трансформаторов – это длительное и дорогостоящее мероприятие. Часто приходится проводить целый ряд сложных испытаний, поскольку современные методы диагностики не всегда четко указывают на место и тип дефекта. Надежность электрической машины во многом определяется надежностью обмоток, которая, в свою очередь, зависит от состояния изоляции. Изоляция работает в сложных, часто очень неблагоприятных условиях. В процессе эксплуатации электрических машин, а также при их хранении и транспортировке они подвергаются различным внешним воздействиям, что со временем приводит к постепенному ухудшению свойств изоляции.

Основными причинами межвитковых замыканий в трансформаторах являются старение изоляции, перенапряжение или плохая организация производства и эксплуатации.

Следует отметить, что в последние годы проделана большая работа по созданию методов диагностики

трансформаторного оборудования, которые при комплексном использовании позволяют адекватно оценить состояние обследуемого объекта с точностью до 98 % [1]. Однако, несмотря на это, количество трансформаторов, которые «выживают» после отказов, связанных с термохимическим старением твердой изоляции, составляет, по разным данным, от 7 до 20 % [2]. Иными словами, от 80 до 93 % отказов трансформаторов вызваны различными дефектами, которые не были своевременно обнаружены. Такая ситуация обусловлена низкой эффективностью традиционной схемы диагностики.

Традиционная схема (плановые комплексные осмотры) была разработана для условий плановой экономики СССР, принципы которой исключали возможность эксплуатации большого количества оборудования сверх проектного срока. Соответственно, период проведения комплексных проверок выбирался с учетом вероятности возникновения и скорости развития дефектов в трансформаторах со сроком службы до 25 лет и не учитывал особенностей развития дефектов в старом оборудовании. В результате в современных условиях всё чаще встречаются случаи, когда за время межповерочного интервала дефект успевает развиться и привести к аварийному выходу трансформатора из строя. В то же время простое сокращение межповерочного интервала приводит к недопустимому увеличению стоимости диагностики, что говорит о необходимости разработки эффективной системы диагностики неисправностей в современных условиях.

Следует помнить, что плановая техническая диагностика позволяет решить следующие задачи: повысить надежность работы трансформаторов; сократить время ремонта; уменьшить количество запасных частей на предприятиях; увеличить срок службы трансформаторов; снизить стоимость ремонтных работ; устранить повторные дефекты.

Для того чтобы можно было проводить техническое обслуживание оборудования исходя из его фактического состояния, ведется активная разработка и внедрение автоматизированных комплексных систем диагностики и диагностирования, позволяющих в различных режимах, не выключая оборудование, оценивать его текущее техническое состояние [3, 4]. Такие

системы помогают выявлять различные виды дефектов, некоторые из них помогают формулировать технические рекомендации по продлению срока службы, планировать циклы обслуживания и ремонта.

Ряд авторов [5] доказывают экономическую целесообразность профилактических испытаний и непрерывного мониторинга силового электрооборудования.

Современные автоматизированные системы диагностики трансформаторов и электрических машин чаще всего разрабатываются для конкретного типа оборудования, и их применение к другим типам оборудования требует трудоемкой настройки библиотеки баз данных и значительного технического развития. Избежать этого недостатка можно за счет использования самообучающихся интеллектуальных систем. Использование ИНС позволяет унифицировать диагностические исследования без необходимости создания библиотек баз данных для каждого типа трансформаторов. Использование этих систем также оптимизировано благодаря простоте практического применения и исключению человеческого фактора при анализе результатов. С увеличением количества исследований вероятность ошибки снижается, а системный подход (оценка многих факторов во времени) повышает точность прогноза.

В связи с этим разработка и исследование высокоэффективных систем диагностического мониторинга состояния трансформаторов, основанных на системном универсальном подходе, и возможность непосредственного применения разработанных диагностических систем в технологическом процессе обслуживания является действительно актуальным научно-техническим вопросом современной системы электроснабжения потребителей железнодорожного транспорта.

Авторами разработана универсальная диагностическая система идентификации и классификации неисправностей трансформаторов и оценки остаточного ресурса изоляции обмоток на основе конволюционных нейронных сетей для трансформаторов нетяговых электросетей сигнализации, централизации, межсистемных линий, предприятий железнодорожных электрических сетей [6].

Традиционные методы испытаний включают в себя измерение различных параметров, таких как сопротивление короткого замыкания, потери холостого хода, коэффициент трансформации, ток намагничивания и сопротивление обмотки.

Современные диагностические системы компании OMICRON – одного из ведущих мировых производителей диагностического оборудования для электроэнергетики, такие как TESTRANO 600 [7], позволяют измерять сопротивление короткого замыкания, потери холостого хода, коэффициент трансформации, намагничивающий ток, сопротивление обмоток и динамическое сопротивление устройства РПН в одном приборе. Управление системой может осуществляться с помощью TESTRANO Touch Control на встроенном дис-

плее или с помощью программного обеспечения Primary Testing Manager TM на компьютере. Система используется для плановых и выездных диагностических проверок, а также для проведения заводских приемочных испытаний (FAT).

Таким образом, при всех безусловных достоинствах используемых в Беларуси систем, они имеют ряд существенных недостатков: направлены на решение конкретной задачи (для конкретных схем, конкретного оборудования и т. д.); используется разнородная и разнотипная информация; не учитывается динамика изменения критериев диагностики оборудования, иными словами, системы не обучаемы. Поэтому использование самообучающихся систем на основе ИНС устраняет перечисленные недостатки.

На основе проведенных исследований авторы описывают технологию определения межвитковых замыканий (IVF), основанную на измерении параметров эквивалентной схемы однофазных трансформаторов. Полученные результаты измерения токов холостого хода с использованием сверточных нейронных сетей (CNN) позволили унифицировать исследования для трансформаторов различной мощности и легко адаптировать их к различным конструкциям.

К основным уравнениям трансформатора, работающего под нагрузкой, относятся уравнения напряжений его первичной и вторичной обмоток, а также уравнение токов в комплексной форме записи:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \underline{z}_1; \\ \underline{U}_2' &= \underline{E}_2' - \underline{I}_2' k^2 \underline{z}_2; \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_0 + (-\underline{I}_2'), \end{aligned}$$

где $\underline{z}_1, \underline{z}_2$ – комплексное сопротивление первичной и вторичной обмоток трансформатора.

Основные уравнения трансформатора могут изображаться либо аналитически в виде векторных уравнений, либо графически в виде векторных диаграмм.

Входное сопротивление трансформатора можно представить в виде определенной электрической схемы, называемой схемой замещения трансформатора, которую легко получить, анализируя три указанных выше уравнения трансформатора.

Так как числа витков первичной и вторичной обмоток трансформатора разные, то ЭДС и токи в этих обмотках также неодинаковы. Поэтому сопоставлять эти величины или строить векторные диаграммы, где величины первичной и вторичной обмоток нужно суммировать, нельзя. Для устранения этого неудобства при исследовании трансформатора принято приводить все параметры вторичной обмотки к числу витков первичной. Приведенные параметры обозначаются индексом штрих

$$\begin{aligned} I_2' &= I_2 / k; U_2' = kU_2; r_2' = k^2 r_2; x_2' = k^2 x_2; \\ U_1 &= I_1 z_{вх} = I_1 \left(z_1 + \frac{(z_2' + z_n) z_0}{z_0 + z_2' + z_n} \right); \end{aligned}$$

Сопротивлению \underline{z}_{BX} соответствует Т-образная схема замещения, представленная на рисунке 1, а. Здесь сопротивление $\underline{z}_0 = r_0 + jx_0$ называется сопротивлением ветви намагничивания.

Активная его составляющая r_0 – это фиктивное сопротивление, обусловленное потерями в стали трансформатора. Реактивное сопротивление x_0 – индуктивное сопротивление взаимоиндукции, обусловленное магнитным сопротивлением основному потоку трансформатора.

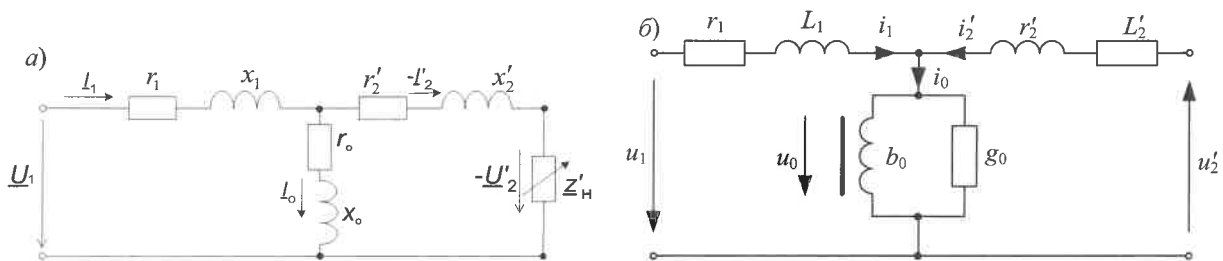


Рисунок 1 – Схема замещения трансформатора:
а – классическая; б – через проводимости намагничивающей ветви

Зная схему замещения трансформатора, параметры которой, за исключением нагрузки, практически постоянны, несложно производить исследование трансформатора при любой нагрузке. Сами же параметры схемы замещения можно определить с помощью опыта холостого хода и опыта короткого замыкания.

В качестве примера для статьи исследовался путевой железнодорожный трансформатор ТС-280Р со следующими паспортными данными: номинальное напряжение на первичной обмотке – 220 В; номинальный ток на первичной обмотке – 1,5 А; номинальное напряжение на вторичной обмотке – 138,4 В; номинальный ток на вторичной обмотке – 2,4 А;

напряжение на вторичной обмотке в режиме холостого хода – 145,3 В; число витков первичной обмотки – 548; число витков вторичной обмотки – 361.

Для анализа процессов, происходящих в трансформаторе при межвитковом замыкании, используем Т-образную схему замещения с представлением ветви намагничивания через проводимости (рисунок 1, б) [8].

Для учета нелинейных характеристик трансформатора выполнялись опыты холостого хода, на основании которых получены зависимости реактивной (b_0) и активной (g_0) проводимостей от амплитуды подводимого к первичной обмотке напряжения U (рисунок 2).

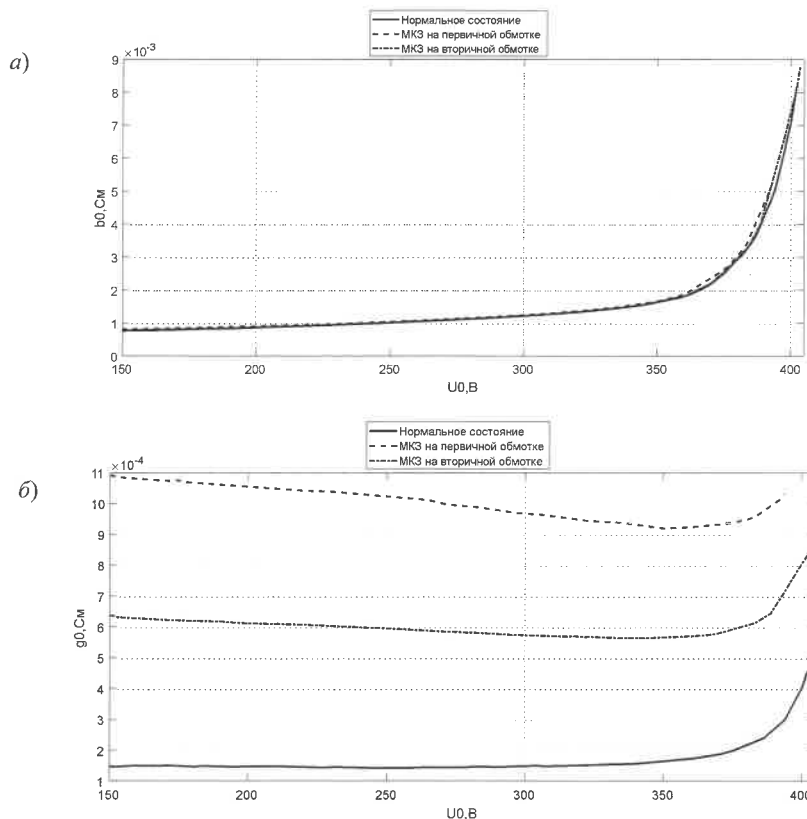


Рисунок 2 – Зависимости реактивной (а) и активной (б) проводимостей от амплитуды напряжения U_0

Как можно видеть из рисунка 2, *a*, при МКЗ на небольшом числе витков, реактивная проводимость практически не изменяется, по сравнению с нормальным состоянием. Активная проводимость g_0 при МКЗ (потери на вихревые токи и гистерезис) изменяется непропорционально квадрату амплитуды магнитной индукции (см. рисунок 2, *б*).

Для построения и моделирования схем замещения в системе компьютерной математики Matlab вместо активной проводимости g_0 была использована вольт-амперная характеристика (рисунок 3, *a*), а вместо реактивной проводимости b_0 – кривая намагничивания (рисунок 3, *б*), где I_{oa} и I_{op} – активная и реактивная составляющие тока намагничивания I_0 .

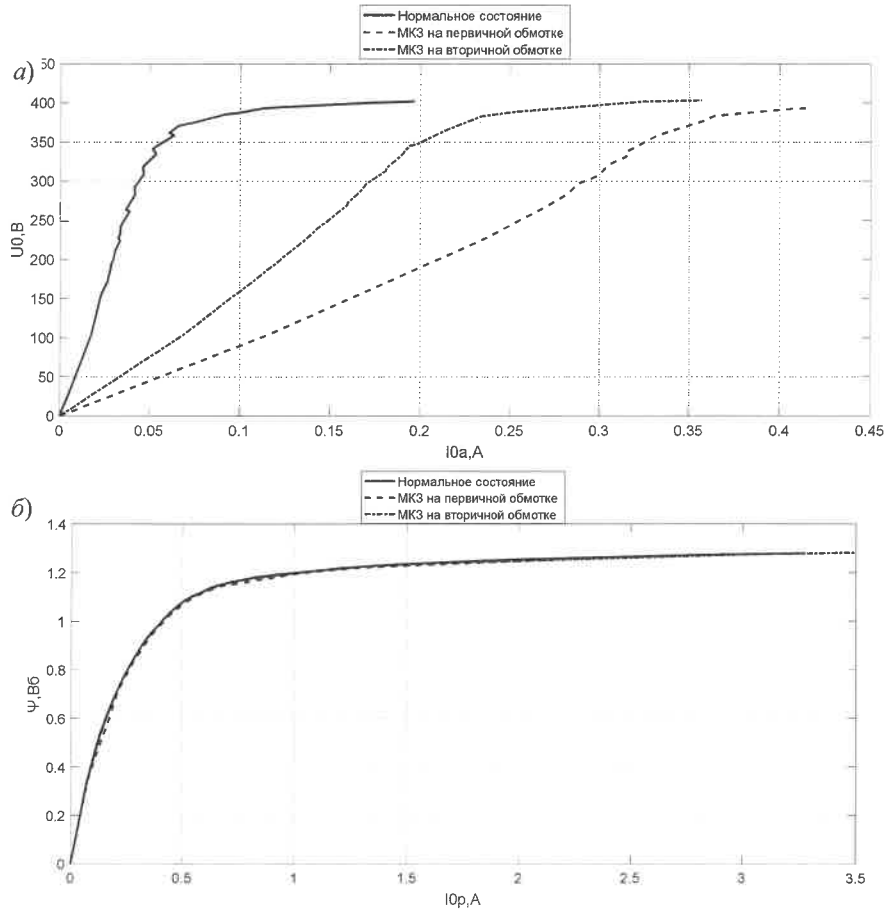


Рисунок 3 – Нелинейные параметры схемы замещения: *a* – вольт-амперная характеристика; *б* – кривая намагничивания

Во время проведения опыта холостого хода при отсутствии неисправностей и для МКЗ на различных обмотках были получены результаты, представленные

в таблице 1. Для определения параметров рассеивания в обмотках был проведен опыт короткого замыкания с использованием RLC-метра (таблица 2).

Таблица 1 – Результаты опытов холостого хода

Состояние	Измерено					Вычислено
	при $U_1 = U_{1н}$					
	$U_1, В$	$U_{20}, В$	$P_0, Вт$	$I_0, А$	$\cos\phi_0$	k
Нормальное	220,0	145,7	7,4	0,28	0,12	1,509
С МКЗ на первичной обмотке	219,9	146,0	43,0	0,34	0,57	1,506
С МКЗ на вторичной обмотке	219,9	144,9	23,3	0,30	0,40	1,519

Таблица 2 – Результаты опытов короткого замыкания

Состояние	Измерено		Вычислено			
	$r_{кз}, Ом$	$L_{кз}, мГн$	$r_1, Ом$	$L_1, мГн$	$r_2, Ом$	$L_2, мГн$
Нормальное	9,61	5,838	4,805	2,919	2,107	1,28
С МКЗ на первичной обмотке	9,39	5,790	4,695	2,895	2,07	1,276
С МКЗ на вторичной обмотке	9,60	5,836	4,800	2,918	2,079	1,264

Как видно из таблицы 2, для небольшого количества короткозамкнутых витков сопротивление $r_{кз}$ и индуктивность $L_{кз}$ значительно не отличаются между

нормальным состоянием и межвитковыми короткими замыканиями.

Для верификации полученных параметров в таблице 2 также учитывались следующие закономерности (значимо влияющими исходными факторами являлись число витков обмоток, температура и длина провода).

Активное сопротивление первичной и вторичной обмоток трансформатора в общем виде

$$r = w l_{cp} / (\rho_{20} S \cdot 10^3),$$

где w – количество витков в обмотке; l_{cp} – средняя длина витка обмотки; ρ_{20} – удельная электрическая проводимость; S – площадь поперечного сечения.

Здесь также следует учесть небольшое увеличение активного сопротивления вследствие роста температуры в месте МКЗ.

Индуктивное сопротивление обмоток трансформатора в общем виде

$$x = 1,58 f l_1 w^2 \lambda_1 \cdot 10^{-8},$$

где l_1 – длина сердечника; λ_1 – нелинейный коэффициент проводимости рассеяния поля.

На основании опытов холостого хода и короткого замыкания было выполнено моделирование трансформатора в нормальном состоянии и при МКЗ с помощью программы Simulink.

Полученные схемы замещения трансформатора и результаты моделирования в режиме холостого хода, представлены на рисунке 4.

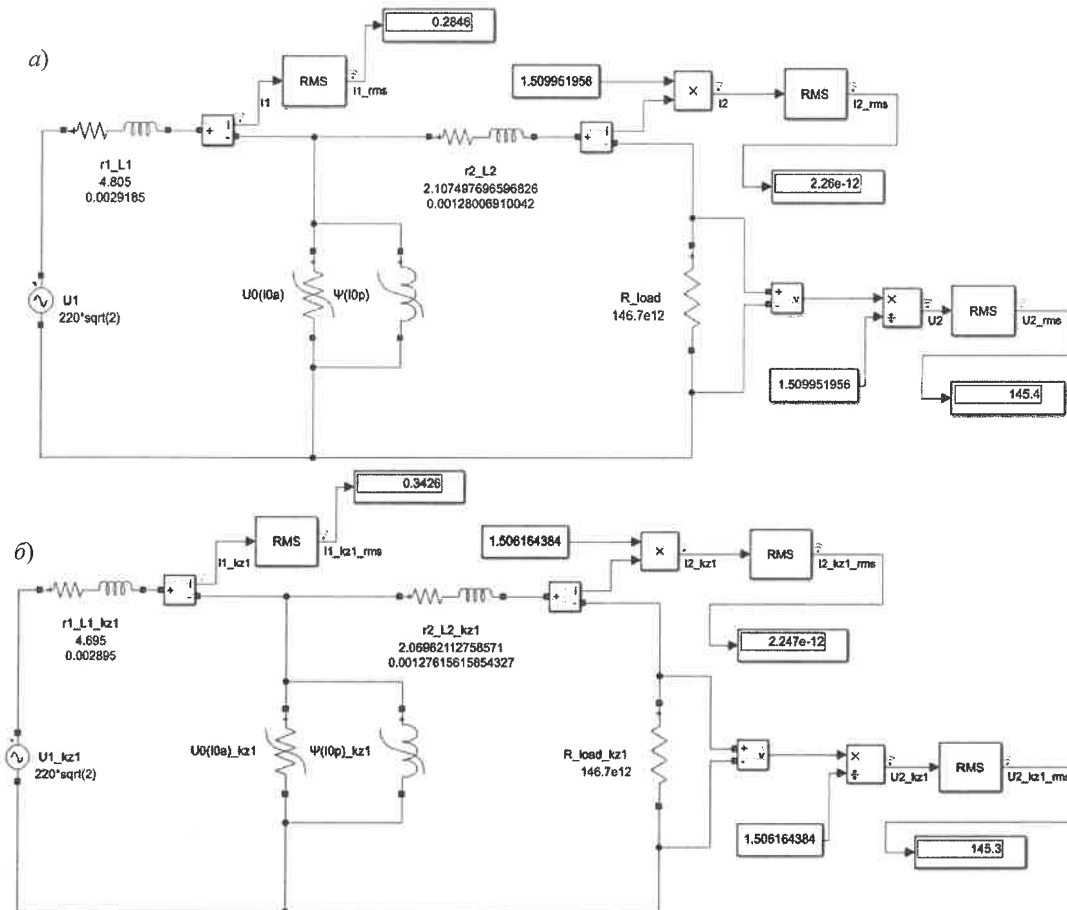


Рисунок 4 – Схемы замещения трансформатора в режиме холостого хода: а – при нормальном состоянии; б – при МКЗ на первичной обмотке

Как видно из полученных результатов (см. рисунок 4), модель полностью согласуется с результатами экспериментов. Причем не только в области холостого хода и короткого замыкания, но и во всём спектре нагрузки между ними. Это дает основание для получения нужных результатов в дальнейшем с помощью данной модели, не прибегая к натурным экспериментам. Также на основании полученных схем замещения можно исследовать переходные процессы, возникающие в момент включения трансформатора, а также формы кривых различных напряжений и токов, в установившемся режиме работы и проводить частотные анализы.

Для приборного диагностирования МКЗ на основе вышеприведенных формул и схем замещения в программе Simulink можно использовать ток намагничи-

вания. На нем отчетливо видны значимые изменения от нормального режима холостого хода при МКЗ на различных обмотках (рисунок 5).

Как видно из рисунка 6, с помощью графиков установившихся процессов тока намагничивания в режиме холостого хода авторы обучили и дополнили возможности уже имеющегося диагностируемого комплекса неисправностей трансформаторов на основе сверточных нейронных сетей [6]. Полученные результаты исследований позволят расширить возможности комплекса в части диагностики испытываемых на наличие МКЗ трансформаторов с определением поврежденной обмотки и оценки количества поврежденных витков не только при непрерывных измерениях, но и при подключении в режиме холостого хода по заявкам предприятий.

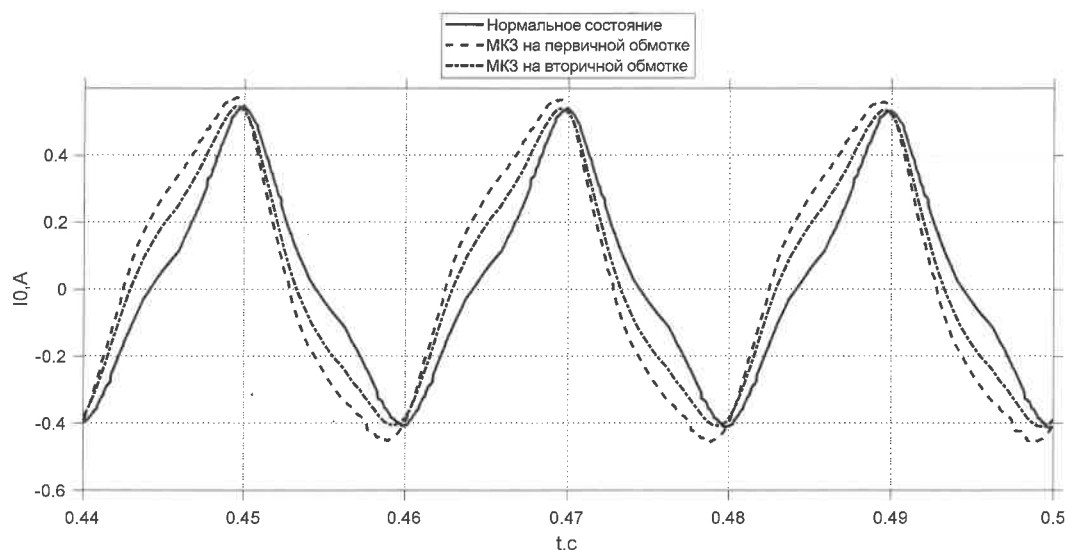


Рисунок 5 – Графики установившихся процессов тока намагничивания в режиме холостого хода

Таким образом рассмотренный математический инструментарий на основе схемы замещения с проводимостями для межвитковых замыканий трансформаторов позволяет решать следующие задачи:

- выполнять анализ электромагнитных процессов для настройки оборудования и аппаратов защиты;
- получать модельным способом выборки для обучения сверточных нейронных сетей;
- исследовать переходные процессы и проводить частотные анализы, возникающие в момент включения;
- унифицировать исследования для трансформаторов различных мощностей и легко адаптировать под различное исполнение.

Список литературы

1 ГОСТ 11677–85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. – Введ.1986-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 39 с.
 2 Попов, Г. В. Алгоритм комплексной диагностики масляных трансформаторов / Г. В. Попов, Ю. Ю. Рогожников // Электрические станции. – 2003. – № 8. – С. 54–59.

Получено 18.03.2024

I. L. Hramyka, V. A. Patskevich. Modeling of electromagnetic processes in a single-phase transformer with interturn short circuits based on a t-shaped exchange circuit

Technology for determining interturn faults, based on the experimental determination of the parameters of the equivalent circuit of single-phase transformers for interturn short circuit is described. The developed mathematical tools based on an equivalent circuit for interturn short circuits will make it possible to obtain samples using a model method for training convolutional neural networks, to unify research for transformers of various powers and to easily adapt them to different designs. The created mathematical model based on an equivalent circuit for interturn closures makes it possible to obtain samples using a model method for training convolutional neural networks.

3 Комбинированные системы сбора передачи технологической и диагностической информации АСУ ТП электроустановок / А. Н. Васев [и др.] // Проблемы энергетики. – 2018. – № 20 (11–12). – С. 16–26.

4 Кубарев, А. Ю. Методы исследования свойств дефектного электрооборудования / А. Ю. Кубарев, А. Б. Акпрова, Ю. Е. Кубарев // Проблемы энергетики. – 2018. – № 20 (3–4). – С. 108–115.

5 Gaser, H. P. Condition Assessment of the Cellulosic Insulation from Power Transformers Taken out of Service / H. P. Gaser, B. Heitrich, C. Krause // Proc. of the Inter. Symp. on High Voltage Engineering. – Beijing (China), 25–29 August 2005. – P. 1–5.

6 Громыко, И. Л. Диагностический комплекс трансформаторов и его применение с помощью сверточных нейронных сетей / И. Л. Громыко, В. О. Белькин, В. Н. Галушко // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2022. – № 2 (45). – С. 92–96.

7 Omicron / Диагностические испытания и мониторинг силовых трансформаторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.omicronenergy.com> – Дата доступа : 18.01.2023.

8 Демирчян, К. С. Теоретические основы электротехники : учеб. для вузов. В 3 т. Т. 2 / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин. – 5-е изд. – СПб.: Питер, 2009. – 432 с.

АНАЛИЗ ИСКАЖЕНИЙ АМПЛИТУДНО-МАНИПУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА КОНТРОЛЯ РЕЛЬСОВЫХ ЛИНИЙ

Рассмотрены особенности расчета бесстыковой тональной рельсовой цепи в нормальном и шунтовом режимах работы. Выполнен анализ составления схем замещения элементов рельсовой цепи. Разработана компьютерная математическая модель для анализа искажений амплитудно-манипулированного сигнала методом спектрального анализа электрических цепей в среде Matlab.

Тональные рельсовые цепи (ТРЦ) третьего поколения в настоящий момент времени являются одними из самых широко распространенных систем контроля рельсовых линий (КРЛ). Надежность и функциональная безопасность систем КРЛ непосредственно влияет как на безопасность перевозочного процесса, так и на эксплуатационные показатели работы железнодорожного транспорта Республики Беларусь.

Использование в ТРЦ сигнального тока тонального диапазона (420–780 Гц), позволило значительно повысить пропускную способность, улучшить помехозащищенность, ослабить взаимные влияния между рельсовыми цепями, снизить потребляемую мощность, уменьшить количество дроссель-трансформаторов и исключить один из самых ненадежных элементов перегонных рельсовых цепей – изолирующие стыки [1, 2, 4].

Целью данной статьи является разработка компьютерной математической модели в среде Matlab для анализа ТРЦ, определения спектра и формы сигнала КРЛ на различных участках рельсовой цепи.

В настоящее время при составлении регулировочных таблиц ТРЦ используют классическую методику расчета, основанную на цепочечном соединении четырехполюсников [1–4] позволяющую рассчитать уровень сигнала КРЛ только в установившемся состоянии. Данный способ расчета сигнала КРЛ не учитывает искажение сигнального тока после его прохождения через элементы аппаратуры ТРЦ. Это в свою очередь может привести к некорректной регулировке ТРЦ в соответствии с нормами.

Как было отмечено в работах [5, 6] для анализа амплитудно-манипулированного (АМн) сигнала в ТРЦ целесообразно использовать метод рядов Фурье. Суть метода заключается в анализе искажений спектра сиг-

нального тока при его прохождении через эквивалентные аппаратуры ТРЦ четырехполюсники с последующим переходом во временную область. Исследования, представленные в работе [6] недостаточно точно отражают искажения спектра сигнала КРЛ, т. к. некоторые элементы аппаратуры имитировались четырехполюсниками с идеальными параметрами. При разработке математической модели в соответствии с методикой изложенной в [7] были определены коэффициенты четырехполюсников аппаратуры ТРЦ.

У любой рельсовой цепи можно выделить следующие режимы работы [1–4]:

1) нормальный режим – рельсовая цепь (РЦ) свободна и исправна, путевой приемник выдает дискретную информацию «Свободно»;

2) шунтовой режим – РЦ занята и исправна, путевой приемник выдает дискретную информацию «Занято»;

3) контрольный режим – РЦ свободна и неисправна (полный электрический разрыв рельсовой нити в любом участке рельсовой линии (РЛ)), путевой приемник выдает дискретную информацию «Занято»;

4) режим АЛСН – РЦ занята и исправна, в рельсовой петле создается уровень кодового сигнала, достаточный для срабатывания локомотивного приемника, расположенного на удаленном от генератора АЛСН конце РЛ;

5) режим короткого замыкания – рельсовая цепь занята и исправна (координата шунта совпадает с координатой подключения путевого генератора), путевой приемник выдает дискретную информацию «Занято»;

Рассмотрим расчет перегонной бесстыковой ТРЦ в нормальном и шунтовом режиме. В нормальном режиме укрупненная схема замещения РЦ будет иметь вид, представленный на рисунке 1.

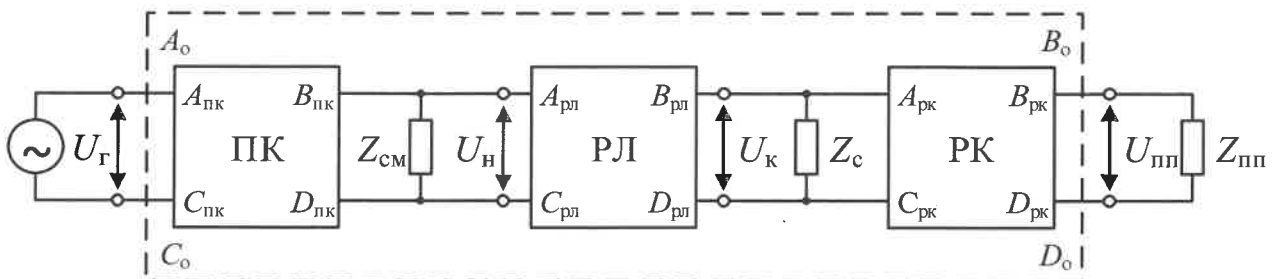


Рисунок 1 – Укрупненная схема замещения бесстыковой ТРЦ в нормальном режиме

Схема замещения представляет собой каскадное соединение четырехполюсников питающего конца (ПК), эквивалентного сопротивления смежной РЦ ($Z_{см}$), четырехполюсника рельсовой линии (РЛ), эквивалентного сопротивления соседней РЦ (Z_c) и четырехполюсника релейного конца (РК) нагруженного на сопротивление путевого приемника ($Z_{пп}$). Зависимость между входными (U_r, I_r) и выходными ($U_{пп}, I_{пп}$) напряжениями РЦ с помощью коэффициентов A_o, B_o, C_o, D_o можно описать уравнением четырехполюсника типа A [8]

$$\left. \begin{aligned} U_r &= A_o U_{пп} + B_o I_{пп} \\ I_r &= C_o U_{пп} + D_o I_{пп} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

или в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} U_r \\ I_r \end{pmatrix} = M_o \begin{pmatrix} U_{пп} \\ I_{пп} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $\begin{pmatrix} U_r \\ I_r \end{pmatrix}$ и $\begin{pmatrix} U_{пп} \\ I_{пп} \end{pmatrix}$ – матрицы-столбцы напряжения и тока соответственно в начале и конце РЦ;

$M_o = \begin{pmatrix} A_o & B_o \\ C_o & D_o \end{pmatrix}$ – квадратная матрица коэффициентов

общего четырехполюсника РЦ.

Матрица коэффициентов общего четырехполюсника вычисляется перемножением матриц четырехполюсников, входящих в рельсовую цепь

$$M_o = M_{ПК} M_{см} M_{рл} M_c M_{РК}, \quad (3)$$

где $M_{ПК}$ – матрица четырехполюсника питающего конца; $M_{см}$ – матрица эквивалентного сопротивления смежной РЦ; $M_{рл}$ – матрица четырехполюсника рельсовой линии; M_c – матрица эквивалентного сопротив-

ления соседней РЦ; $M_{РК}$ – матрица четырехполюсника релейного конца.

Матрицы $M_{см}$ и M_c представляют собой параллельно включенное входное сопротивление ($Z_{вх}$) смежной / соседней РЦ:

$$Z_{вх} = \frac{AZ_H + B}{CZ_H + D}, \quad (4)$$

где Z_H – сопротивление нагрузки, представляющее собой входное сопротивление путевого приемника (ПП) или обратное входное сопротивление путевого фильтра (ФПМ); A, B, C, D – коэффициенты матрицы общего четырехполюсника соответственно питающего или релейного конца смежной / соседней рельсовой цепи.

Стоит отметить, что при длине смежной рельсовой линий более 500 м при расчетах достаточно учитывать ее входное сопротивление в режиме холостого хода [11].

Матрица четырехполюсника ПК (рисунок 2, а) в общем случае состоит из следующих элементов: фильтра путевого ($M_{фпм}$), разделительного конденсатора АЛС ($M_{алс}$), кабельного резистора (M_k), кабельной линии (КЛ) от поста ЭЦ до путевого ящика ПК ($M_{кп}$), путевого трансформатора типа ПОС2-50 ($M_{пт}$), защитного резистора (M_3) и дроссель-трансформатора ($M_{дт}$).

Матрица четырехполюсника РК (рисунок 2, б) свою очередь может состоять из дроссель-трансформатора ($M_{дт}$), защитного резистора (M_3), путевого трансформатора типа ПОС2-50 ($M_{пт}$), КЛ от поста ЭЦ до путевого ящика РК ($M_{кп}$), кабельного резистора (M_k) и разделительного конденсатора АЛС ($M_{алс}$).

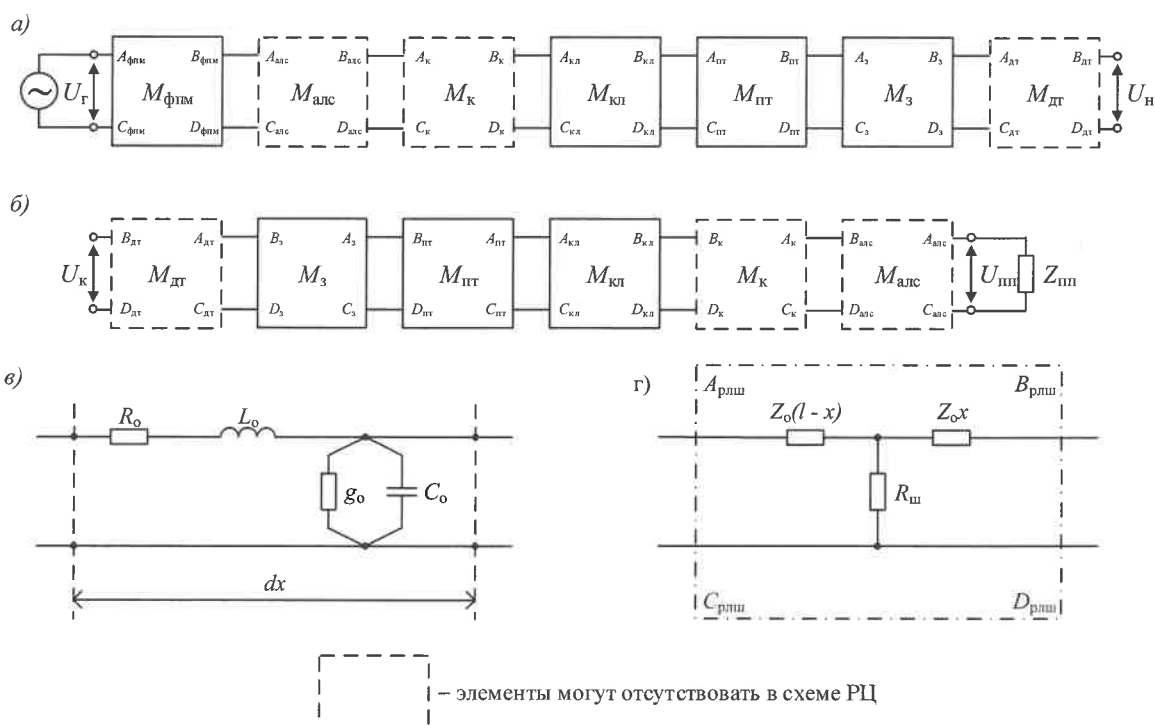


Рисунок 2 – Схемы замещения для участков РЦ:

а – матрица ПК; б – матрица РК; в – рельсовая / кабельная линия; г – рельсовая линия в шунтовом режиме

Типы, количество и номиналы элементов ПК и РК выбираются на основании исходных данных к расчету (путевые планы перегонов или двухниточные планы станций) и могут корректироваться по результату выполненного расчета.

Рельсовые и кабельные линии можно рассматривать как цепи с распределенными параметрами [4, 8]. Для получения уравнений однородной линии их можно условно представить в виде отдельных участков бесконечно малой длины dx со структурой, представленной на рисунке 2, в. Под первичными параметрами линии будем понимать сопротивление R_0 , индуктивность L_0 , проводимость g_0 и ёмкость C_0 , отнесенные к единице её длины. Их значения могут изменяться в широких пределах в зависимости от конструкции [9]. Полное километрическое сопротивление линии находится как $Z_0 = R_0 + j\omega L_0$, а полная километрическая проводимость изоляции – как $Y_0 = g_0 + j\omega C_0$, где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота сигнального тока.

Коэффициенты четырехполюсника для линии с распределенными параметрами определяются следующим образом [1–3]:

$$\left. \begin{aligned} A &= \operatorname{ch}(\gamma l) \\ B &= Z_B \operatorname{sh}(\gamma l) \\ C &= \gamma l / Z_B \\ D &= \operatorname{ch}(\gamma l) \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где γ – коэффициент распространения волны; Z_B – волновое сопротивление волны. Волновое сопротивление и коэффициент распространения волны называют вторичными параметрами линии.

Вторичные параметры для РЛ и КЛ вычисляются по следующим формулам [1–4]:

$$\gamma = \sqrt{Z_0 Y_0}, \quad (6)$$

$$Z_B = \sqrt{Z_0 / Y_0}. \quad (7)$$

При выполнении расчета принимались следующие первичные параметры КЛ для кабеля марки СБПАШП [9] с диаметром жилы 0,9 мм: $R_0 = 59$ Ом, $C_0 = 50$ нФ, $g_0 = 0$ См, $L_0 = 0$ Гн.

Для расчета вторичных параметров РЛ вместо проводимости g_0 , как правило, используют ее обратную величину – сопротивление изоляции r_n . При расчете РЦ на частотах до 2 кГц, сопротивление изоляции будет чисто активным [1–4], т. е. $C_0 = 0$. С учетом этого выражения (6) и (7) примут следующий вид:

$$\gamma = \sqrt{Z_0 / r_n}, \quad (8)$$

$$Z_B = \sqrt{Z_0 r_n}. \quad (9)$$

Сопротивление изоляции РЛ r_n изменяется от десятых долей Ом·км до десятков Ом·км и зависит от типа шпал, состояния балласта и погодных условий. Для расчета РЦ на перегоне с нормальным сопротивлением балласта минимальное расчетное значением $r_n = 1$ Ом·км, а максимальное $r_n = 50$ Ом·км.

Полное километрическое сопротивление РЛ Z_0 зависит от ее первичных параметров. В справочной литературе [1–4] приведены значения Z_0 только для

некоторых частот. Для анализа влияния РЛ на форму сигнала КРЛ воспользуемся математической моделью РЛ. Основными параметрами для создания математической модели РЛ являются [1, 4]:

Активное сопротивление рельсов, Ом/км, определяется по формуле Неймана [1]

$$R_a = \frac{0,28}{u} \sqrt{\mu_{er} \rho f}, \quad (10)$$

где u – периметр поперечного сечения рельса, м; μ_{er} – относительная магнитная проницаемость рельсовой стали; ρ – удельное сопротивление РЦ, Ом·мм²/м; f – частота сигнального тока.

В области слабых магнитных полей, создаваемых сигнальными токами величиной до 30 А, при расчетах РЦ начальное значение относительной магнитной проницаемости рельсов берут равным $\mu_{er} \approx 100$ [10].

Протекая по РЛ переменный ток создает магнитный поток, часть которого находится в пределах каждого рельса, а часть – между рельсами. В соответствии с этим полную удельную индуктивность двухпроводной линии L_n можно представить в следующем виде [1, 3]:

$$L_n = L_e + 2(L_i + L_{ст}), \quad (11)$$

где L_e – внешняя индуктивность двухпроводной линии, Гн/км; L_i – внутренняя индуктивность целой рельсовой нити, Гн/км; $L_{ст}$ – индуктивность стыковых соединителей, приходящихся на 1 км рельсовой нити, Гн/км.

Внутренняя индуктивность, так же как и активное сопротивление рельсов, зависит от частоты переменного тока и магнитной проницаемости стали [1]

$$L_i = \frac{0,0955 R_a}{f}. \quad (12)$$

Удельная внешняя индуктивность двухпроводной однородной линии будет зависеть от ее геометрических параметров [1, 3]:

$$L_e = 0,4 \cdot 10^{-3} \ln \frac{a-b}{b}, \quad (13)$$

где a – расстояние между осями рельсов, м; $b = u/2\pi$ – радиус эквивалентного проводника, м.

Согласно [1, 3] полное километрическое сопротивление РЛ Z_0 переменному току, Ом/км,

$$Z_0 = 2 \left(R_a + \sum_1^n r_{ст} \right) + j\omega L_n = |Z_0| e^{j\varphi_{z_0}}, \quad (14)$$

где $r_{ст}$ – активное сопротивление стыковых соединителей, Ом/км; n – количество стыковых соединителей, приходящихся на 1 км рельсовой нити.

Параметры (10)–(14) определялись для рельсов типа Р65 с длиной плетей 25 м с приварными стыковыми соединителями. Частотные зависимости вторичных параметров РЛ определялись по (8), (9) для различных значений сопротивления изоляции и представлены на рисунке 3.

Для получения частотных характеристик вторичных параметров РЛ также можно выполнить интерполяцию нормативных значений [6].

Для обеспечения работы РЦ в шунтовом режиме, необходимо, чтобы при максимальном напряжении источника питания и наилучших условиях для передачи сигнала, напряжение (ток) на входе путевого приемника были не выше значений его надежного отпускания. При расчете шунтового режима схема замещения РЛ, заменяется схемой, представленной на рисунке 2, з. Коэффициенты четырехполюсника РЛ определяются из соотношений

$$\left. \begin{aligned} A_{\text{рлш}} &= 1 + \frac{Z_0 \cdot (l-x)}{R_{\text{шн}}} \\ B_{\text{рлш}} &= Z_0 \cdot l + \frac{Z_0 x \cdot Z_0 (l-x)}{R_{\text{шн}}} \\ C_{\text{рлш}} &= 1/R_{\text{шн}} \\ D_{\text{рлш}} &= 1 + \frac{Z_0 x}{R_{\text{шн}}} \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

где l – длина рельсовой линии; x – расстояние от приемного конца до места наложения шунта; $R_{\text{шн}}$ – сопротивление нормативного шунта.

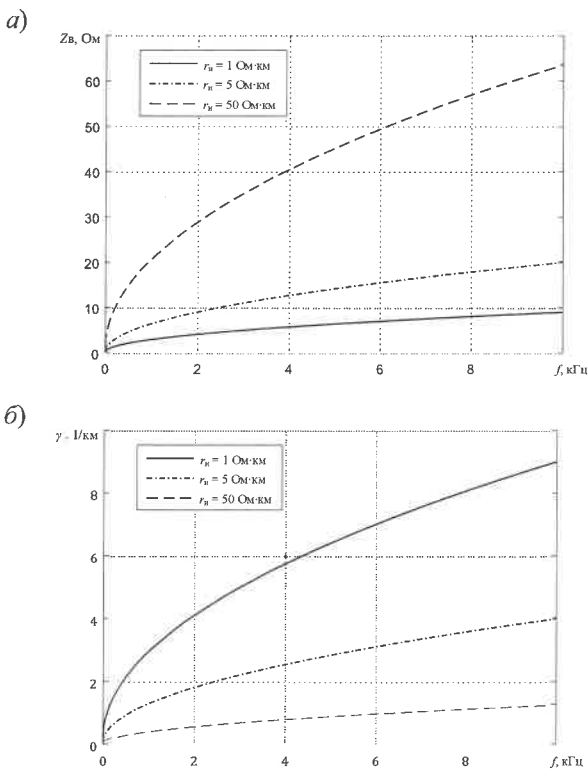


Рисунок 3 – Расчетные частотные зависимости:

a – модуля волнового сопротивления рельсовой линии;

b – модуля коэффициента распространения рельсового тракта;

С учетом (15) выражение (3) примет следующий вид:

$$M_0 = M_{\text{пк}} M_{\text{см}} M_{\text{рлш}} M_{\text{с}} M_{\text{рк}}, \quad (16)$$

где $M_{\text{рлш}} = \begin{bmatrix} A_{\text{рлш}} & B_{\text{рлш}} \\ C_{\text{рлш}} & D_{\text{рлш}} \end{bmatrix}$ – квадратная матрица коэффициентов четырехполюсника РЛ в шунтовом режиме.

Зная фактическое напряжение на путевом генераторе, рассчитанное в нормальном режиме, определяют напряжение на входе путевого приемника в шунтовом

режиме и сравнивают его с максимально допустимым напряжением отпускания.

Для расчета РЦ в остальных режимах работы необходимо использовать соответствующие схемы замещения [1–4].

Режим работы РЦ можно характеризовать передаточными функциями при заданном сопротивлении приемника. Комплексная передаточная функция по напряжению на участке i РЦ [8]

$$K_{U_i}(j\omega) = \frac{U_{\text{вых}_i}(j\omega)}{U_{\text{вх}_i}(j\omega)} = \frac{Z_{\text{н}}(j\omega)}{A_i(j\omega)Z_{\text{н}}(j\omega) + B_i(j\omega)}, \quad (17)$$

где $U_{\text{вых}_i}$ – комплексное выходное напряжение на участке i ; $U_{\text{вх}_i}$ – комплексное входное напряжение на участке i ; $Z_{\text{н}}$ – комплексное сопротивление нагрузки; A_i и B_i – коэффициенты четырехполюсника i , через который проходит сигнал КРЛ.

Знание коэффициентов четырехполюсников аппаратуры входящей в состав РЦ, частотных зависимостей РЛ и РК, а также частотной характеристики входного сопротивления ПП позволяет определять комплексные коэффициенты передачи на любом участке РЦ.

При составлении компьютерной модели для анализа ТРЦ использовался спектральный метод анализа электрических цепей [8]. С помощью инструментов среды Matlab был произведен синтез АМн сигнала КРЛ $u_r(t)$ (рисунок 4, а). АМн сигнал имеет вид последовательности радиоимпульсов с прямоугольной огибающей. С помощью преобразования Фурье находится спектр сигнала $u_r(t)$ в начале РЦ (рисунок 4, б)

$$U_r(j\omega) = \int_0^{\infty} u_r(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (18)$$

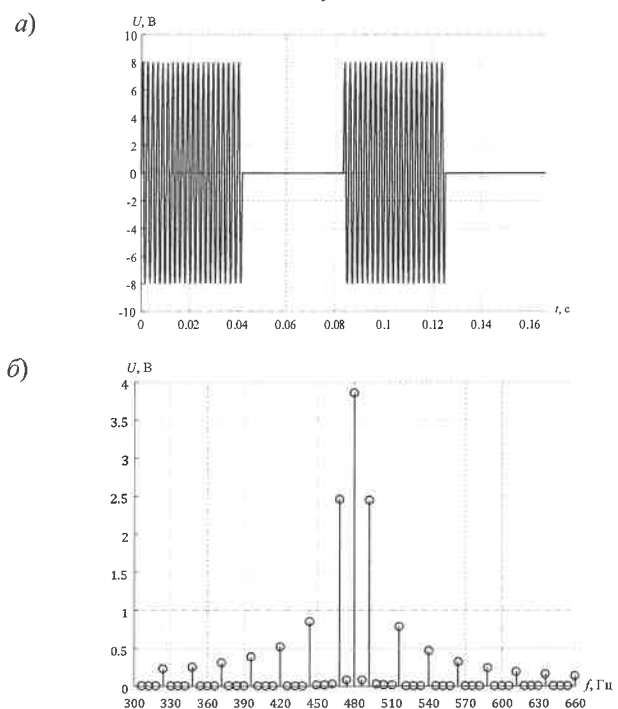


Рисунок 4 – Временная (а) и частотная (б) характеристика АМн сигнала в начале РЦ

После этого для анализа сигнала КРЛ на любом участке РЦ с помощью выражений (17) и (4) определяется комплексная частотная характеристика четырехполюсника, через который проходит сигнал, коэффициенты A_i и B_i соответственно берутся для исследуемого четырехполюсника. Определяется спектр сигнала на выходе участка i

$$U_{\text{вых}_i}(j\omega) = U_{\text{вх}_i}(j\omega)K_{U_i}(j\omega). \quad (19)$$

Для перехода во временную область используется обратное преобразование Фурье

$$u_{\text{вых}_i}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} U_{\text{вых}_i}(j\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (20)$$

Как можно увидеть из выражения (17) ($Z_n = Z_{\text{ин}}$), для анализа искажений АМн сигнала КРЛ помимо частотных характеристик четырехполюсников необходимо также определить частотную характеристику входного сопротивления путевого приемника.

Путевые приемники ППЗ, ППЗМ предназначены для приема и дешифрования АМн сигнала с несущими частотами (f_n) в диапазоне от 420 до 780 Гц, частотой модуляции (f_m) 8 или 12 Гц и входят в состав аппаратуры КРЛ при любом виде тяги поездов [12]. Подавление сигналов соседних РЦ, сигналов АЛС, гармоник тягового тока осуществляется с помощью входного полосового фильтра, собранного из двух пар связанных колебательных контуров [6].

Для определения входного сопротивления путевого приемника примем из работы [6] схему замещения входной цепи и базовые аналитические зависимости (формулы (21), (22)).

Первый колебательный контур состоит из катушки L_1 , индуктивно связанной с катушкой L_2 , и обеспечивает требуемое значение входного сопротивления. L_2 , C_2 и L_3 , C_3 представляют пару связанных контуров (рисунок 5). В данную схему для учета влияния входного сопротивления транзисторного каскада, а также потерь в контурах введены резисторы R_2 и R_3 [6].

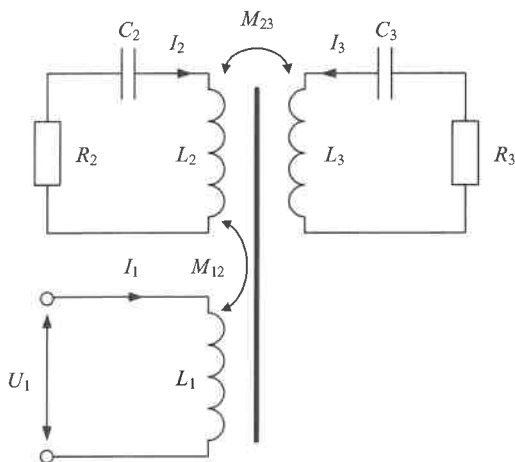


Рисунок 5 – Схема замещения входной цепи путевого приемника

Выражения для токов $\dot{I}_{1,2,3}$, возбуждаемых в контурах входного фильтра в комплексной форме,

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}_2 Z_{12}, \\ -\dot{I}_1 Z_{12} = \dot{I}_2 Z_2 + \dot{I}_3 Z_{23}, \\ -\dot{I}_2 Z_{23} = \dot{I}_3 Z_3, \end{cases} \quad (21)$$

где $Z_1 = j\omega L_1$, $Z_2 = R_2 + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)$,

$Z_3 = R_3 + j\left(\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_3}\right)$ – полные сопротивления

контуров; $Z_{12} = j\omega M_{12}$, $Z_{23} = j\omega M_{23}$ – сопротивления связи, M_{12} и M_{23} – взаимные индуктивности контуров.

Из системы уравнений (21) получим выражение для определения входного сопротивления путевого приемника

$$Z_{\text{вх}} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = Z_1 - \frac{Z_{12}^2 Z_3}{Z_2 Z_3 - Z_{23}^2}. \quad (22)$$

В соответствии с выражением (22) рассчитана идеальная частотная характеристика входного сопротивления путевого приемника для частоты 480 Гц (рисунок 6, а). Полученная частотная характеристика соответствует характеристикам, указанным в [4, 12]. Однако стоит отметить, что при эксплуатации довольно часто встречаются приемники, у которых входное сопротивление на частоте f_n ниже среднего значения, допускаемого по ТУ, а сопротивление на частотах $f_n \pm \pm f_m$ могут отличаться в 2,2–2,5 раза [13] (рисунок 6, б), что также необходимо учитывать при моделировании.

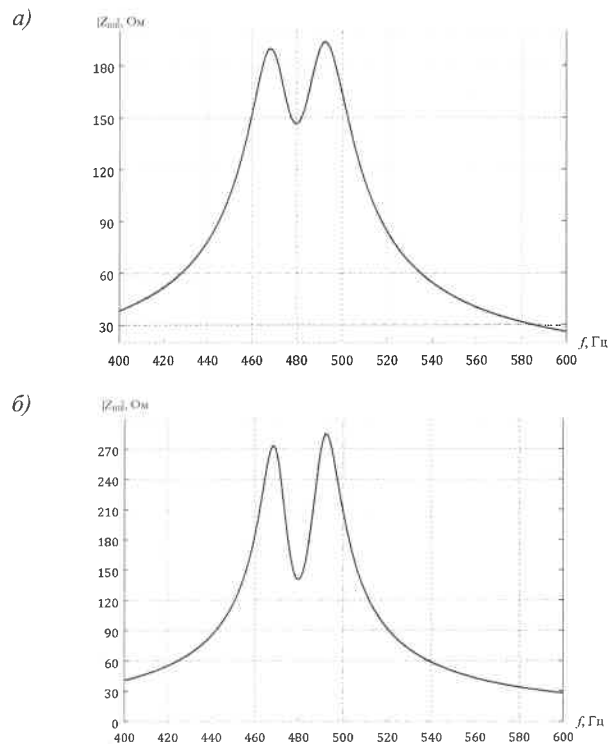


Рисунок 6 – Частотные зависимости модуля входного сопротивления путевого приемника

Полученные в соответствии с описанной моделью частотные и временные диаграммы сигнала КРЛ представлены на рисунке 7.

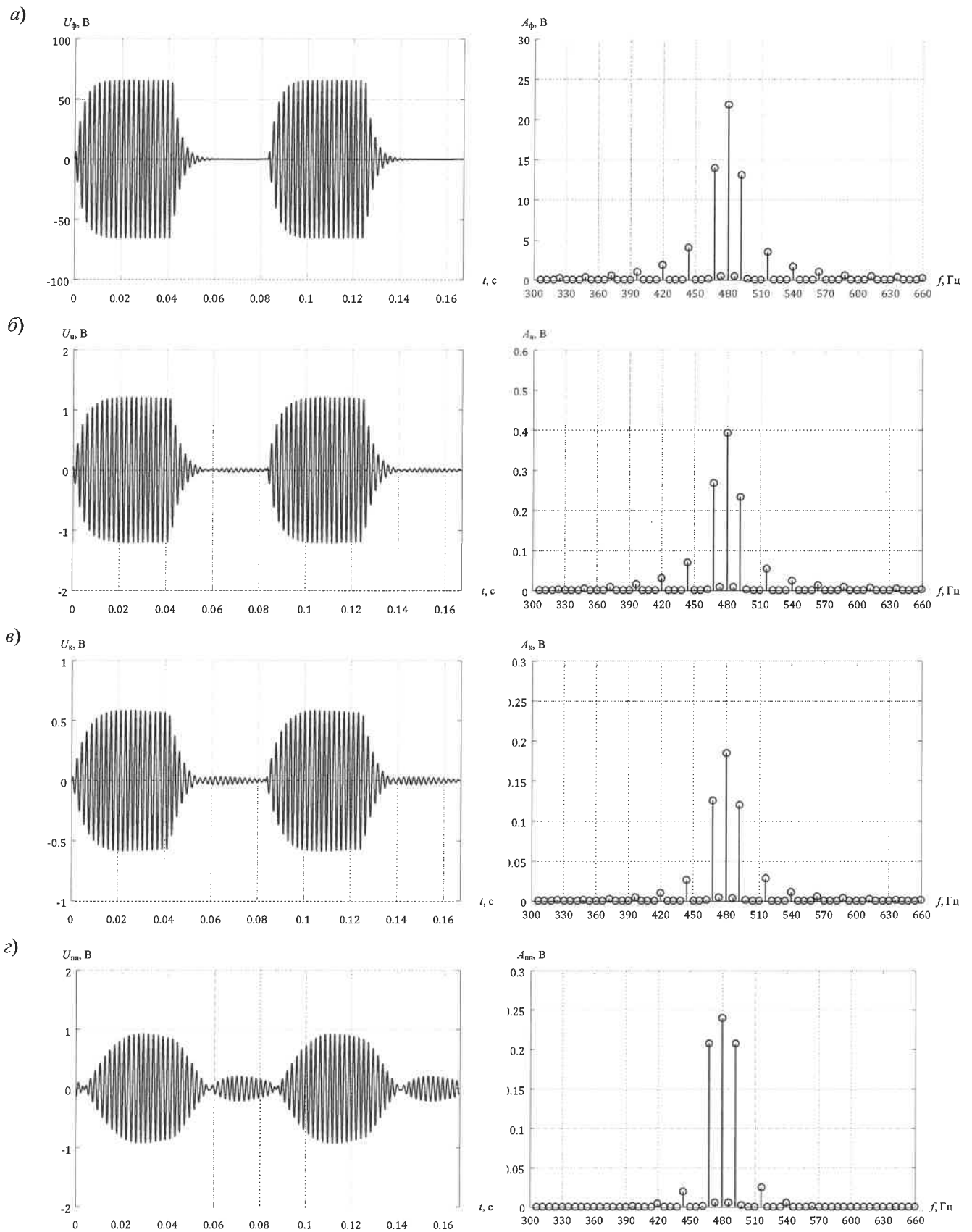


Рисунок 7 – Временные и частотные диаграммы сигналов:
 а – на выходе ФПМ; б – в начале РЛ; в – в конце РЛ; г – на входе ПП

Для исследования искажений АМн сигнала КЛР в нормальном режиме была смоделирована бесстыковая ТРЦ со следующими параметрами:

- 1) несущая частота – 480 Гц;
- 2) моделирующая частота – 12 Гц;
- 3) длина РЦ – 0,7 км;
- 4) длина смежных РЦ – 0,65 и 0,59 км;
- 5) длина кабеля ПК – 1,1 км;
- 6) длина кабеля РК – 1,8 км;
- 7) емкость конденсатора АЛС – 4 мкФ;
- 8) выход ФПМ – 12–61;
- 9) сопротивление балласта – 1 Ом·км;
- 10) коэффициент трансформации согласующих трансформаторов типа ПОС2-50 – 38;
- 11) сопротивление защитного резистора ПК – 2,2 Ом;
- 12) сопротивление защитного резистора РК – 0,23 Ом;
- 13) сопротивление кабельных резисторов – 47 Ом.

Входное сопротивление путевого приемника соответствует рисунку 6, а.

Не трудно заметить, что при прохождении через аппаратуру ТРЦ сигнал КРЛ значительно искажается. Путевой фильтр ФПМ значительно ограничивает верхнюю и нижнюю боковую полосу спектра сигнала КЛР, что в свою очередь приводит к затягиванию фронта и среза импульсов сигнала (см. рисунки 4 и 7, а). Форма сигнала в начале и конце РЛ (рисунки 7, б, в) соответствует форме сигнала на выходе путевого фильтра. Это позволяет сделать вывод, что устройства защиты и согласования, а также кабельная линия влияют в основном на амплитуду сигнала КРЛ.

Форма сигнала на входе путевого приемника значительно искажена (рисунок 7, г). Это объясняется спецификой конструкции входного полосового фильтра, состоящего из двух связанных контуров имеющих два частных резонанса, что приводит к еще большему ограничению амплитудного спектра сигнала КРЛ, а также к искажению фазового спектра. В связанных контурах на частотах частных резонансов возникают свободные колебания, что приводит к появлению в паузе дополнительного импульса.

Использование спектрального метода анализа тональных рельсовых цепей позволяет определить не только уровень, но и частотную и временную зависимость сигнала КРЛ на входе путевого приемника при различных значениях напряжения путевого генератора.

Полученные зависимости сигнала КРЛ будут полезны при разработке новых аппаратно-программных средств контроля состояния рельсовой линии. Предложенный метод анализа может использоваться для анализа рельсовых цепей с различными формами сиг-

нального тока, а также для поиска новых более информативных форм сигнального тока.

Список литературы

- 1 **Аркатов, В. С.** Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. – М. : Транспорт, 1990. – 295 с.
- 2 Рельсовые цепи магистральных железных дорог : справ. / В. С. Аркатов [и др.]. – 3-е изд. – М. : ООО «Миссия-М», 2006. – 496 с.
- 3 **Брылеев, А. М.** Теория, устройство и работа рельсовых цепей / А. М. Брылеев, Ю. А. Кравцов, А. В. Шишляков. – М. : Транспорт, 1978. – 344 с.
- 4 **Кулик, П. Д.** Тональные рельсовые цепи в системах ЖАТ: построение, регулировка, обслуживание, поиск и устранение неисправностей, повышение эксплуатационной надежности / П. Д. Кулик, Н. С. Ивакин, А. А. Удовиков. – К. : Мануфактура, 2004. – 288 с.
- 5 **Комнатный, Д. В.** Анализ искажений амплитудно-манипулированного сигнала тональных рельсовых цепей / Д. В. Комнатный // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 160-летию Белорусской железной дороги. В 2 ч. Ч. 1, Гомель, 24–25 ноября 2022 года / под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2022. – С. 220–221.
- 6 **Гончаров, К. В.** Исследование переходных процессов в тональных рельсовых цепях / К. В. Гончаров // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2013. – Вип. 4. – С. 8–17.
- 7 **Медведев, Д. Д.** Определение первичных параметров элементов ЖАТС с ферромагнитными компонентами / Д. Д. Медведев, С. И. Хоменко, И. О. Жигалин // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2023. – № 2 (47). – С. 11–13.
- 8 Основы теории цепей : учеб. для вузов / Г. В. Зевеке [и др.], – 5-е изд., перераб. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
- 9 **ГОСТ Р 56292–2014.** Кабели для сигнализации и блокировки. Общие технические условия. – Введ. впервые ; введ. РФ 2014–11–26. – М. : РСТ, 2014. – 27 с.
- 10 **Шаманов, В. И.** Параметры рельсовых линий в задачах электромагнитной совместимости / В. И. Шаманов, Ю. А. Трофимов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – № 4 (48). – С. 196–203.
- 11 **Медведев, Д. Д.** Определение длины смежных и соседних рельсовых линий для решения задач расчета бесстыковых рельсовых цепей / Д. Д. Медведев, С. И. Хоменко // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию БелИИЖТа – БелГУТа. В 2 ч. Ч. 1, Гомель, 16–17 ноября 2023 года. – Гомель : БелГУТ, 2023. – С. 226–228.
- 12 **Сороко, В. И.** Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики : справ. 4 кн. Кн. 1 / В. И. Сороко, Ж. В. Фотькина. – 4-е изд. – М. : НПФ «Планета», 2013. – 1060 с.
- 13 Корректный метод контроля и расчета параметров сигналов тональных рельсовых цепей / Ю. А. Кравцов, [и др.] // Наука и техника транспорта. – 2009. – № 4. – С. 37–43.

Получено 13.03.2024

D. D. Medvedev. Distortion analysis of the amplitude-manipulated rail line control signal.

The article considers the peculiarities of calculating a jointless tonal rail circuit in normal and shunt modes of operation. The analysis of substitution diagrams of rail circuit elements is performed. A computer mathematical model for analyzing distortions of amplitude-manipulated signal by the method of spectral analysis of electric circuits in Matlab environment is developed.

УДК 621.311

Д. В. МИРОШ, магистр технических наук, В. М. ОВЧИННИКОВ, кандидат технических наук, И. Е. МОНАРХОВИЧ, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ МЕЖВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В ТРАНСФОРМАТОРАХ И АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Приведена обобщенная технология применения сверточных нейронных сетей для диагностики межвитковых замыканий в однофазных трансформаторах с воздушным охлаждением и трехфазных асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором, основанная на использовании исходных данных в виде графиков отношений энергетических характеристик электропотребления. Применение разработанных нейронных сетей для диагностики трансформаторов и трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором позволяет унифицировать диагностические исследования для указанного оборудования различных мощностей и легко адаптировать их под различное исполнение.

Анализ используемых методов и диагностических систем указывает на определенную сложность их дальнейшего развития. Это обусловлено во многом сложностью входных сигналов, достаточным большим числом входных данных, нелинейными множественными динамическими взаимосвязями с другими параметрами. Данный недостаток в увеличении точности диагностирования и распознавания образов возможно решить за счет применения искусственных нейронных сетей (ИНС).

Искусственный интеллект довольно быстро развивается, поэтому существует большое количество литературы, описывающей работу нейронных сетей в системах электроснабжения предприятий и варианты применения их на практике [1].

Главным преимуществом ИНС при диагностике является ее гибкость при большом потоке данных и информационном шуме. Главный же недостаток заключается в вопросах ее разработки и относительной длительности времени обучения. Для сокращения времени обучения до приемлемых результатов используются обобщенно-регрессионная нейронная сеть (GRNN) с топологией прямой передачи сигнала, вероятностная нейронная сеть (PNN) и адаптивная (самоорганизующаяся) нечеткая нейронная сеть [2].

В последние годы нейронные сети становятся важным инструментом в области диагностики и прогнозирования состояния различных технических систем. Они обладают способностью обучаться, выявлять сложные закономерности, что может послужить важным инструментом для обнаружения дефектов в различных объектах диагностирования. Для машин переменного тока проблемы с межвитковыми замыканиями являются серьезной и весьма распространенной угрозой как для непосредственно трансформаторов и асинхронных двигателей, так и для обслуживающего персонала. Межвитковые замыкания могут привести к перегреву, повреждению обмоток и даже пожару. Поэтому своевременное и упреждающее обнаружение межвитковых замыканий является важной задачей для обеспечения непрерывной работы электрооборудования и безопасности работников предприятий.

Относительно недавние исследования показывают, что нейронные сети успешно применяются для диагностики межвитковых замыканий. В одном из иссле-

дований, представленном в [3], авторы предложили метод диагностики межвитковых замыканий в трансформаторах на основе глубоких нейронных сетей [4]. Этот метод показал высокую точность и надежность в обнаружении замыканий даже при наличии шума и других помех. Также диагностика трансформаторов, но уже с помощью сверточных нейронных сетей, описана в [5]. Другие исследования в [6] подтверждают эффективность нейронных сетей при диагностике в асинхронных двигателях. В работе авторы предложили метод на основе сверточных нейронных сетей для обнаружения и классификации различных дефектов в асинхронных двигателях, включая межвитковые замыкания. Также в работах [4] и [6] авторы дополнительно указывают на возможность применения современных технологий на предприятиях железнодорожной отрасли. Проводится количественный анализ по факту выхода из строя асинхронных двигателей, используемых в качестве тяговых и вспомогательных машин на электровозах серии ВЛ-80С, БКГ1 и БКГ2, что вносит некоторый поправочный коэффициент по наиболее часто встречающимся неисправностям. Дополнительно исследуется расширение возможностей работы сверточной нейронной сети с различными входными данными: температура, ток, вибрация и другие.

Применение нейронных сетей для диагностики целого ряда неисправностей в целом и межвитковых замыканий в частности в трансформаторах и асинхронных двигателях является перспективным направлением исследований. А их широкое освещение в научном мире может свидетельствовать о высокой эффективности данного инструмента.

В материале данной статьи изложена обобщенная технология применения сверточных нейронных сетей для диагностики межвитковых замыканий в трансформаторах (I) и асинхронных двигателях (II), основанная на использовании исходных данных в виде графиков отношений характеристик электропотребления (в качестве регистрирующего оборудования применялись энергометры) и разработанное программное обеспечение (на основе программных комплексов MatLab и Python) в виде сверточных нейронных сетей (CNN).

I Однофазные трансформаторы.

Приведем три основных этапа реализации диагностического комплекса обнаружения межвитковых замыканий трансформатора [6].

1 Формирование исходных данных для сверточных нейронных сетей (CNN).

Поступившие от энергометров результаты измерений напряжений, активных мощностей и токов

первичной и вторичной обмоток делятся друг на друга (рисунок 1), что позволяет работать с относительными величинами и реагировать на изменение их отношений. Далее полученные отношения записываются в специальные инициализированные массивы, размер которых равен ширине изображения.

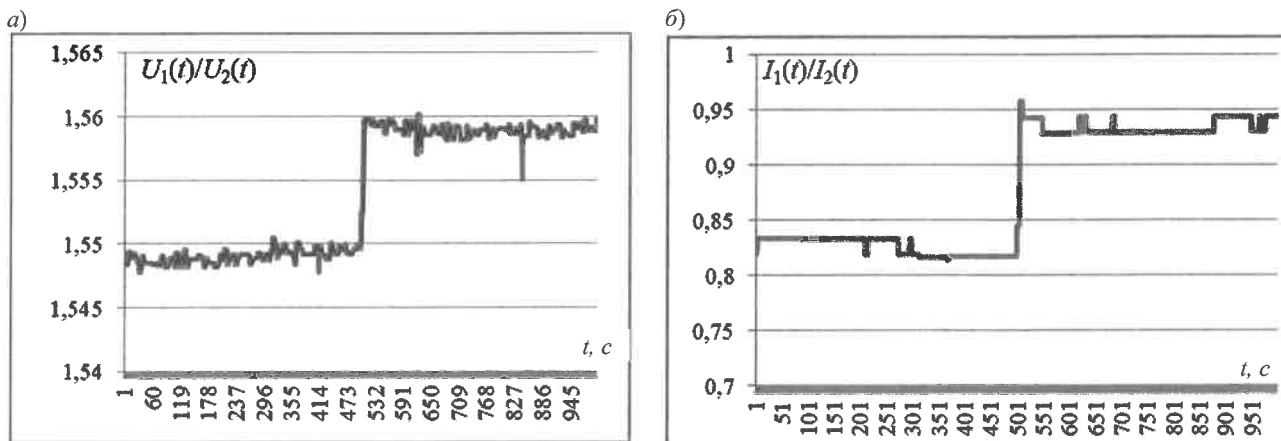


Рисунок 1 – Пример зависимостей отношений от времени:
а – напряжений; б – токов

2 Обработка изображений для использования в качестве исходных данных нейронными сетями.

После того как массивы полностью заполнятся исходными данными, необходимо в каждом из них найти максимальное и минимальное значения для определения границ графиков зависимостей.

Координатами пикселей по оси ординат являются индексы ячеек каждого из массивов. По получившимся координатам производится изменение цвета пикселей на изображении с белого на черный. Затем выполняется прорисовка вертикальных линий между соседними пикселями. В результате получаются изображения, которые передаются на входы CNN.

Аналогично работают сверточные нейронные сети, отвечающие за идентификацию по отношению токов и активных мощностей.

Каждая CNN на выходе выдает номер класса, к которому относится неисправность трансформатора.

3 Обработка результатов и формирование заключения.

После детектирования изображений тремя CNN производится окончательный анализ с целью повышения точности полученного решения о наличии неисправности, алгоритм которого приведен на рисунке 2.

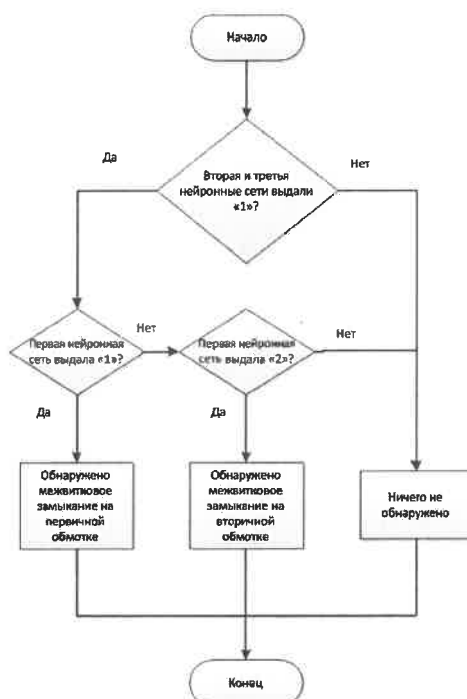


Рисунок 2 – Алгоритм анализа результатов с нейронных сетей

Кратко опишем архитектуру нейронной сети реализованной в программе MatLab. Во входном слое (Image Input Layer) указывается размер изображения, который в данном случае составляет $67 \times 88 \times 1$. Эти числа соответствуют высоте, ширине и размеру канала. Цифровые данные состоят из изображений в градациях серого.

В сверточном слое (Convolutional Layer) первым аргументом является Filter Size, который функция обучения использует при сканировании изображений. Вторым аргументом – это количество фильтров (num Filters) или нейронов. Этот параметр определяет количество карт объектов.

После слоя нормализации партии следует нелинейная функция активации (ReLU Layer). Наиболее распространенной функцией активации является выпрямленная линейная единица (ReLU).

За сверточными слоями (с функциями активации) иногда следует операция понижения дискретизации (максимальный объединяющий слой MaxPooling Layer), которая уменьшает пространственный размер карты объектов и удаляет избыточную пространственную информацию. Понижающая выборка позволяет увеличить количество фильтров в более глубоких сверточных слоях без увеличения необходимого объема вычислений на слой. Одним из способов понижения частоты дискретизации является использование максимального пула, который создается с помощью maxPooling2dLayer. Слой максимального пула возвращает максимальные значения прямоугольных областей входных данных, заданных первым аргументом poolSize. Аргумент пары «имя – значение» (Stride) за-

дает размер шага, который выполняет обучающая функция при сканировании данных.

Вслед за слоями свертки и понижающей дискретизации следуют один или несколько полносвязных слоев (FullyConnectedLayer). В нем нейроны соединяются со всеми нейронами предыдущего слоя. Этот слой объединяет все признаки, изученные предыдущими слоями на изображении, чтобы идентифицировать более крупные закономерности. Последний полносвязный слой объединяет функции для классификации изображений. Параметр OutputSize в последнем полносвязном слое равен количеству классов в целевых данных.

Функция активации softmax нормализует вывод полностью подключенного слоя. Выходные данные слоя softmax состоят из положительных чисел, которые в сумме дают единицу и могут использоваться в качестве вероятностей классификации слоем классификации.

Последним слоем является классификационный слой (Classification Layer). Он использует вероятности, возвращаемые функцией активации softmax для каждого входа, чтобы назначить вход одному из взаимоисключающих классов и вычислить точность.

Также в качестве исходных данных для диагностирования МКЗ может использоваться ток намагничивания. Например, на рисунке 3 хорошо различимы значимые изменения при МКЗ на различных обмотках и нормальном режиме, причем CNN имеет высокую чувствительность к малому числу короткозамкнутых витков обмоток.

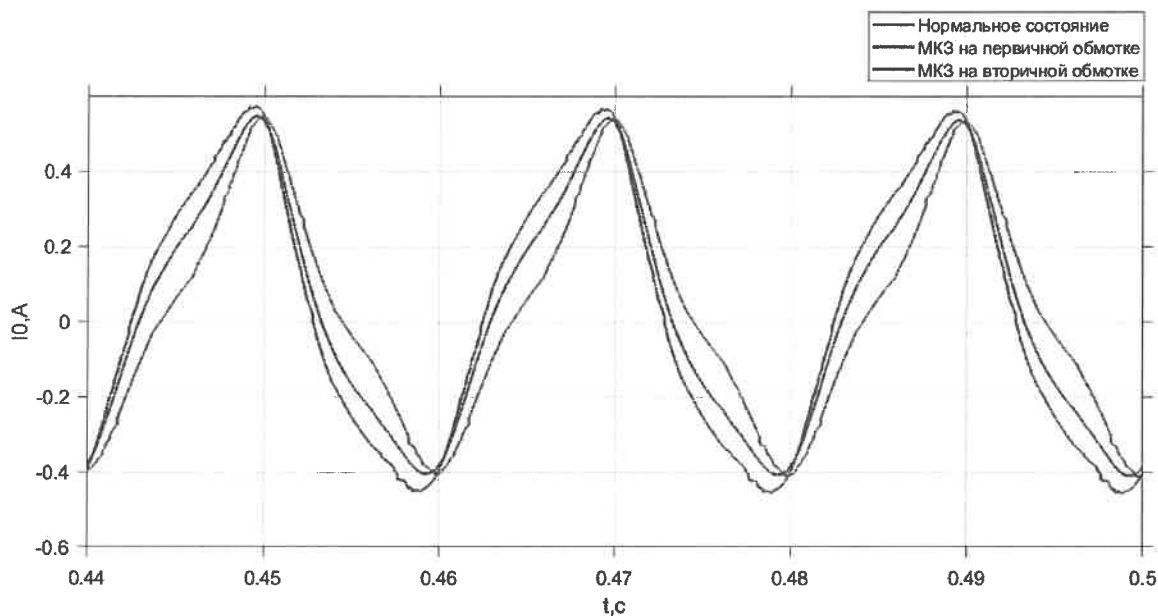


Рисунок 3 – Графики тока намагничивания в режиме холостого хода

Полученные результаты исследований позволяют определить поврежденную обмотку и оценить количество поврежденных витков не только при непрерывных измерениях, но и при подключении в режиме холостого хода по заявкам предприятий.

II Трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором.

Для асинхронных двигателей (АД) помимо контроля отношений токов также учитывались такие ин-

формативно значимые параметры, как температура и вибрация, позволяющие диагностировать большую часть основных неисправностей.

Данные по вибродиагностике с предварительным распределением по степени тяжести дефектов были получены в локомотивном депо Гомель во время диагностирования подшипников колесно-моторных блоков локомотивов при помощи переносного вибронализатора СД-21. Пример представлен на рисунке 4.

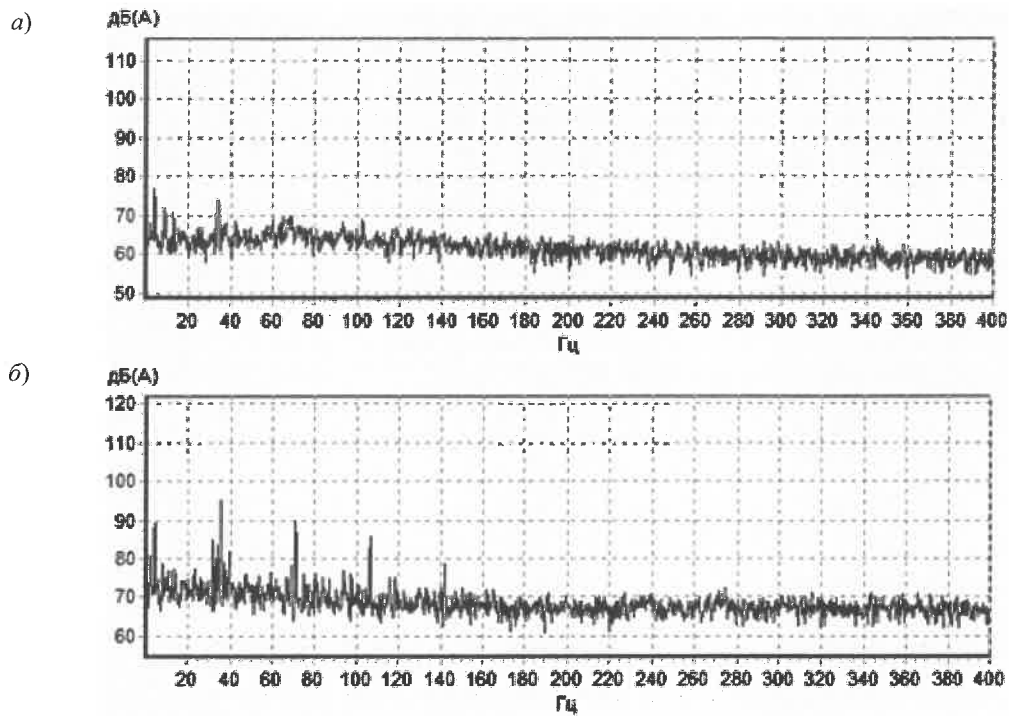


Рисунок 4 – Пример вибродиаграмм для подшипника:

a – дефекты отсутствуют или незначительны;

б – требуется разборка узла с оценкой текущего состояния и объема обслуживания или ремонта

Полученные в результате вибродиагностики диаграммы использовались в качестве исходных данных для обучения нейронной сети. Данная процедура при выборе рационального процесса обучения позволяет автоматизировать и унифицировать процесс диагностики, а также работать с зашумленными данными, устранить (либо сократить) влияние человеческого фактора. Далее приведены наиболее значимые процедуры и слои структуры, реализованной авторами CNN.

В данном исследовании разработанная авторами сверточная ИНС реализована в библиотеке Tensor Flow для языка Python 3.10. CNN по результатам вибродиагностики имеет два сверточных слоя с пулингом, за которыми следуют два полносвязных слоя

и выходной слой для классификации на три степени тяжести дефектов.

Для получения исходных данных для АД с короткозамкнутым ротором при МВЗ в качестве испытуемых электродвигателей были использованы трехфазные АД с однослойной вьюпной обмоткой и классом изоляции обмоток статора – В. Искусственно были созданы повреждения изоляции для различного числа витков (рисунок 5). Контролируемое управление режимами МКЗ осуществлялось с помощью реле (включение, отключение, переключение на различное число короткозамкнутых витков обмотки фазы статора), закрепленной на подшипниковой крышке.

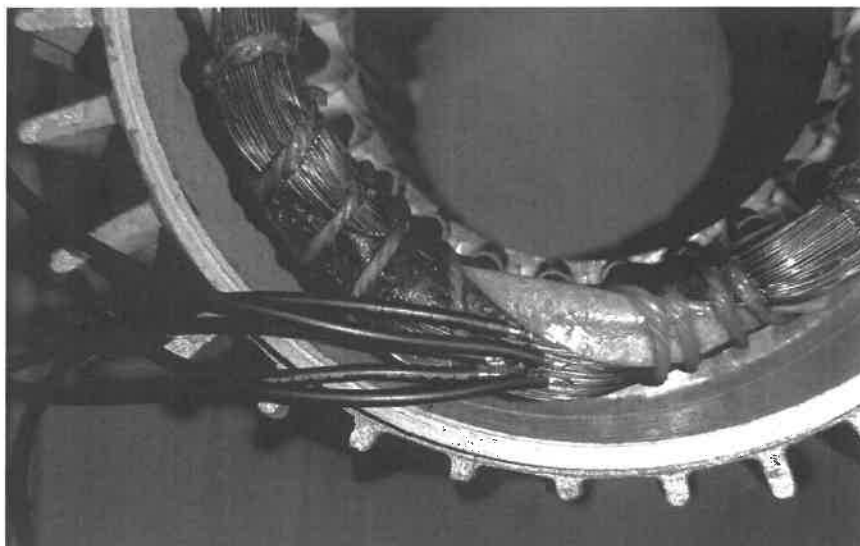


Рисунок 5 – Испытуемый статор асинхронного двигателя мощностью 0,12 кВт

Для определения МВЗ при работе АД без отключения использовались в качестве исходных данных отношения токов I_A / I_B , I_B / I_C , I_C / I_A , получаемые от энергометров, при контроле сетевого напряжения. Программное обеспечение на ноутбуке импортирует полученные исходные данные в графическом виде для дальнейшей обработки сверточными нейронными сетями. Обучающая выборка должна включать достаточно большой массив данных. В нашем случае 80 % результатов используется для обучения. Использование графических изображений позволяет унифицировать исследования для АД различных мощностей и легко адаптировать под различное исполнение.

На основании экспериментов и результатов аналитического моделирования был составлен обобщенный алгоритм определения межвитковых замыканий для трехфазных АД с короткозамкнутым ротором при различных схемах подключения обмоток:

1) «звезда с нейтральным проводом»: увеличивалось отношение фазного тока по отношению к двум оставшимся фазным токам, при неизменном линейном напряжении во время всех измерений.

2) «звезда с изолированной нейтралью»: увеличение двух фазных токов (для однослойной всыпной обмотки), одним из которых является ток в поврежденной обмотке, и снижение оставшегося.

3) «треугольник»: увеличение линейного тока по отношению к двум оставшимся линейным токам.

В настоящее время авторами была усовершенствована структура имеющейся нейронной сети. Ее целью являлась большая адаптивность под различный масштаб исходных данных, увеличение числа влияющих факторов и отсутствие переобучения CNN. Для достижения этих результатов была использована комбинация сверточных слоев, пулинга, полносвязных слоев и слоев объединения. Приведем краткое описание полученной усовершенствованной нейронной сети.

Входной слой принимает изображения размером 67×88 пикселей с одним каналом (черно-белые изображения).

Первый блок свертки (Conv2D) используется для извлечения признаков из изображения. Используется несколько слоев с разными параметрами (размер ядра, количество фильтров), чтобы захватить различные уровни абстракции. Пулинг применяется после первого блока свертки для уменьшения размерности и улучшения вычислительной эффективности. Три параллельных блока CNN начинаются с разделения выходного слоя первого блока пулинга и затем применяются различные сверточные слои для извлечения дополнительных признаков. Выходные данные из всех трех блоков объединяются в один вектор. Слой Dropout с коэффициентом 0,5 нацелен на уменьшение переобучения. Выходной полносвязный слой с функцией активации softmax генерирует вероятности принадлежности к каждому из трех классов.

Отличие этой модели от других (CNN, Inception или GoogLeNet, ResNet) заключается в том, что три параллельных блока рассмотренной нейронной сети позволяют ей извлекать различные характеристики изображения в разных масштабах и с разной глубиной. Такой подход может улучшить способность модели к обобщению и улучшить ее производительность на разных типах данных.

Использование различных комбинаций сверток и пулинга в каждом из параллельных блоков позволяет модели захватывать различные аспекты изображения, что может быть полезно в различных задачах компьютерного зрения.

На рисунке 6 представлены для примера результаты классификации нейронной сетью отношений токов. На рисунке 7 представлена графическая визуализация схождения значения ошибки для тестовых и обучающих выборок. Данный график указывает на отсутствие переобучения при обучении большим количеством эпох в случае нехватки данных.

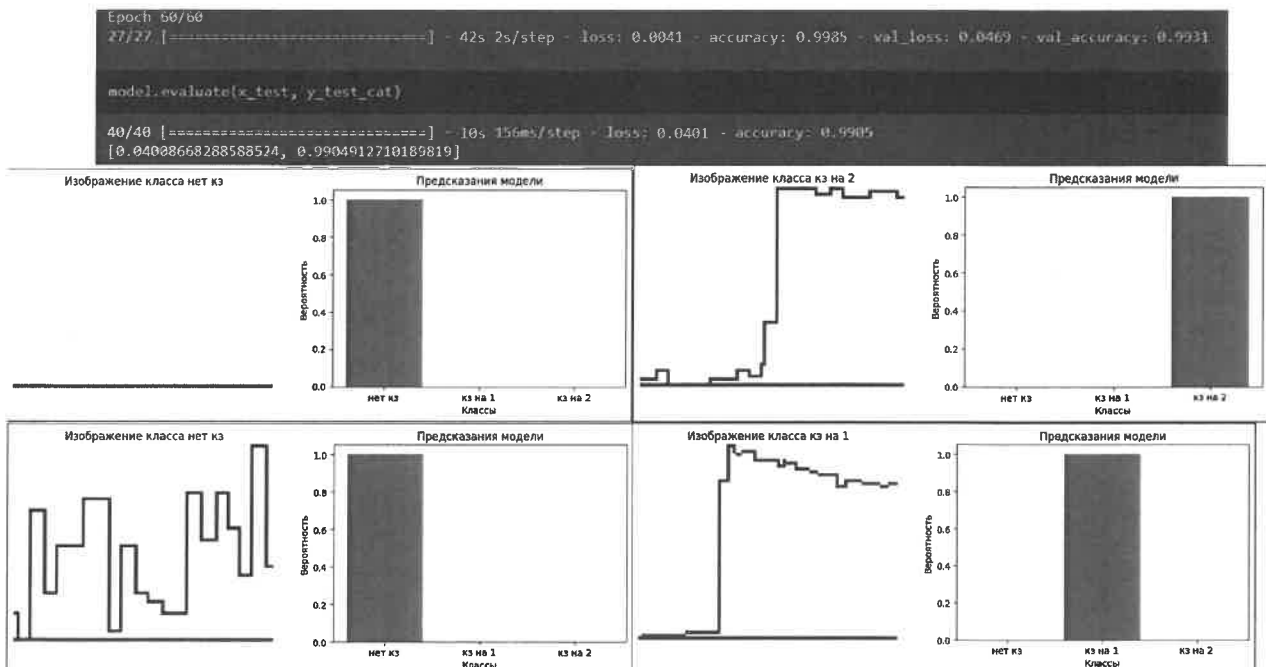


Рисунок 6 – Пример визуального представления результатов классификации нейронной сетью МКЗ по отношению токов

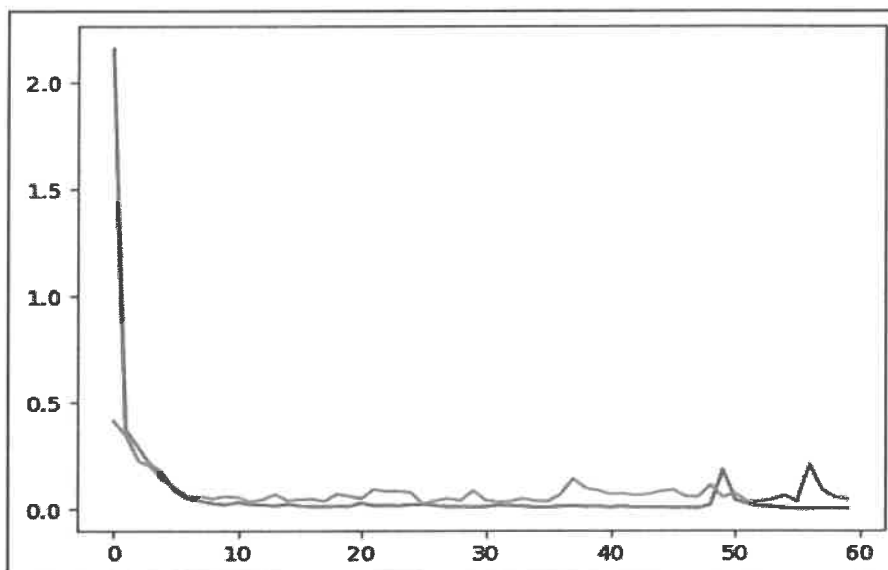


Рисунок 7 – Пример схождения значения ошибки для тестовых и обучающих выборок

Применение разработанной нейронной сети для диагностики трансформаторов и трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при межвитковых замыканиях позволяет унифицировать диагностические исследования для различных мощностей и легко адаптировать под различное исполнение. Простота практического применения и устранение влияния человеческого фактора при анализе результатов позволяет с ростом числа обучающей выборки снижать вероятность ошибки при классификации повреждений, и в дальнейшем на основе оценки большого числа факторов в динамике увеличить точность прогнозирования результатов диагностических исследований.

Список литературы

1 Хаханов, В. И. Применение искусственных нейронных сетей для диагностирования цифровых сетей / В. И. Хаханов, О. В. Щерба. – Радиоэлектронные и компьютерные системы, 2010. – 20 с.

Получено 19.03.2024

D. V. Mirosh, V. M. Ovchinnikov, I. E. Monarkhovich. Technology of application of neural networks for diagnostics of interturn failures in transformers and asynchronous motors.

The generalised technology of application of convolutional neural networks for diagnostics of inter-turn faults in transformers and three-phase squirrel cage induction motors is presented, based on the use of initial data in the form of graphs of relations of energy characteristics of power consumption. Application of the developed neural networks for diagnostics of transformers and three-phase squirrel cage induction motors allows to unify diagnostic studies for the specified equipment of different capacities and easily adapt them to different designs.

2 Вопросы реализации оценки технического состояния силового оборудования на электрических подстанциях / А. И. Хальясмаа [и др.] // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2013. – № 1 (45). – С. 289–300.

3 Deep learning for winding interturn fault diagnosis in transformers / Y. Zhang [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 66 (3). – P. 2240–2249.

4 **Мирош, Д. В.** Нейронные сети в диагностике. Анализ неисправностей асинхронных двигателей железнодорожной отрасли и их диагностика на базе искусственного интеллекта / Д. В. Мирош, В. Н. Галушко, И. Л. Громыко // Энергоэффективность. – 2023. – № 4. – С. 30–32.

5 **Дробов, А. В.** Система диагностирования неисправностей трансформаторов на основе сверточных нейронных сетей / А. В. Дробов, В. Н. Галушко, И. Л. Громыко // Энергетическая стратегия. – 2023. – № 4 (94). – С. 49–53.

6 **Громыко И. Л.** Диагностический комплекс трансформаторов и его применение с помощью сверточных нейронных сетей / И. Л. Громыко, В. О. Белькин, В. Н. Галушко // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2022. – № 2 (45). – С. 92–96.

АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

УДК 656.13.05

*С. А. АЗЕМША, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель***ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ
НА ПЛОЩАДИ ЛЕНИНА г. ГОМЕЛЯ**

Качество организации дорожного движения на крупных городских площадях имеет важное значение для обеспечения безопасности, улучшения транспортной доступности и снижения потерь в дорожном движении. Хорошо спланированная инфраструктура и организация движения способствуют более эффективному использованию городских пространств, обеспечивают удобство для пешеходов и велосипедистов, а также способствуют снижению выбросов вредных веществ в атмосферу. Кроме того, хорошо организованное дорожное движение способствует повышению общего уровня комфорта жизни горожан и созданию благоприятной городской среды для жизни и отдыха, что в свою очередь дает предпосылки развитию экономики города за счет улучшения транспортной инфраструктуры и обеспечения более эффективного функционирования городской жизни.

Статья посвящена проблеме повышения эффективности дорожного движения на площади Ленина в г. Гомеле. Рассматриваются современные методы улучшения организации транспортного потока, оптимизации инфраструктуры и повышения безопасности дорожного движения на данной территории. Предлагается комплексный подход к решению проблемы, включающий анализ существующих проблем, разработку инновационных решений и практические рекомендации для улучшения ситуации на площади Ленина применением пакета прикладных программ для моделирования дорожного движения. Результаты и выводы, представленные в статье, могут быть полезны как для специалистов в области градостроительства и транспортного планирования, так и для органов местного самоуправления и общественных организаций, заинтересованных в улучшении дорожной инфраструктуры и обеспечении безопасности дорожного движения в городе.

Введение. Эффективная организация дорожного движения на крупных городских площадях требует комплексного подхода, включающего в себя не только инженерные и технические решения, но и учет потребностей пешеходов, велосипедистов, общественного транспорта и личных автомобилей. Такой подход способствует созданию более безопасной и удобной городской среды для всех участников дорожного движения. Помимо этого, эффективная организация дорожного движения на крупных городских площадях способствует снижению уровня шума и вибраций, что в свою очередь благоприятно влияет на здоровье горожан и общую атмосферу в городе.

Для повышения эффективности организации дорожного движения разработаны и успешно используются специализированные программные продукты для транспортного планирования и моделирования. В статье моделируется работа площади Ленина в г. Гомеле в программном продукте ArteryLite [1, 2] и на основании этого предлагаются инженерные решения по повышению эффективности дорожного движения в данном транспортном узле.

Постановка задачи. Площадь Ленина расположена на пересечении ул. Пролетарской – пл. Ленина – пр. Ленина. Она является одной из центральных площадей в городе Гомеле, важным объектом городской инфраструктуры и имеет значительное транспортное значение, которое заключается в том, что она является крупным транспортным узлом города. Она соединяет различные районы и улицы, что делает ее ключевым местом для общественного и индивидуального транспорта. Наличие культурных объектов тяготения и мест отдыха делает ее крупным центром тяготения.

В настоящее время на рассматриваемом пересечении находятся три нерегулируемых пешеходных перехода, что обуславливает существенные потери транспортных потоков (ТП) при обеспечении приоритетного движения пешеходов через них [3, 4]. Поэтому введение светофорного регулирования и увязка его работы с координированным регулированием по ул. Советской позволят снизить потери в дорожном движении на пересечении ул. Пролетарской – пл. Ленина – пр. Ленина в г. Гомеле.

Основная часть.

На рисунке 1 приведена существующая схема организации дорожного движения (ОДД). При такой схеме ОДД ТП с входов А, В и D имеют конфликт минимум с двумя пешеходными потоками, движущимися по двум нерегулируемым пешеходным переходам. ТП со входа С имеет один нерегулируемый конфликт с пешеходным потоком при движении на выход В или три нерегулируемых конфликта с пешеходными потоками – при движении на выход А или D. Необходимость уступать дорогу пешеходам, пересекающим проезжую часть по нерегулируемым пешеходным переходам, обуславливает высокие потери ТП и снижает эффективность ДД.

Кроме того, при существующей схеме ОДД транспортные средства (ТС), движущиеся в направлении DA, снижают скорость перед поворотом налево, что существенно снижает пропускную способность направлений AC и AB и повышает потери времени ТС, движущихся в указанных направлениях.

Всё это обуславливает необходимость повышения эффективности дорожного движения на рассматриваемом пересечении путем совершенствования схемы ОДД.

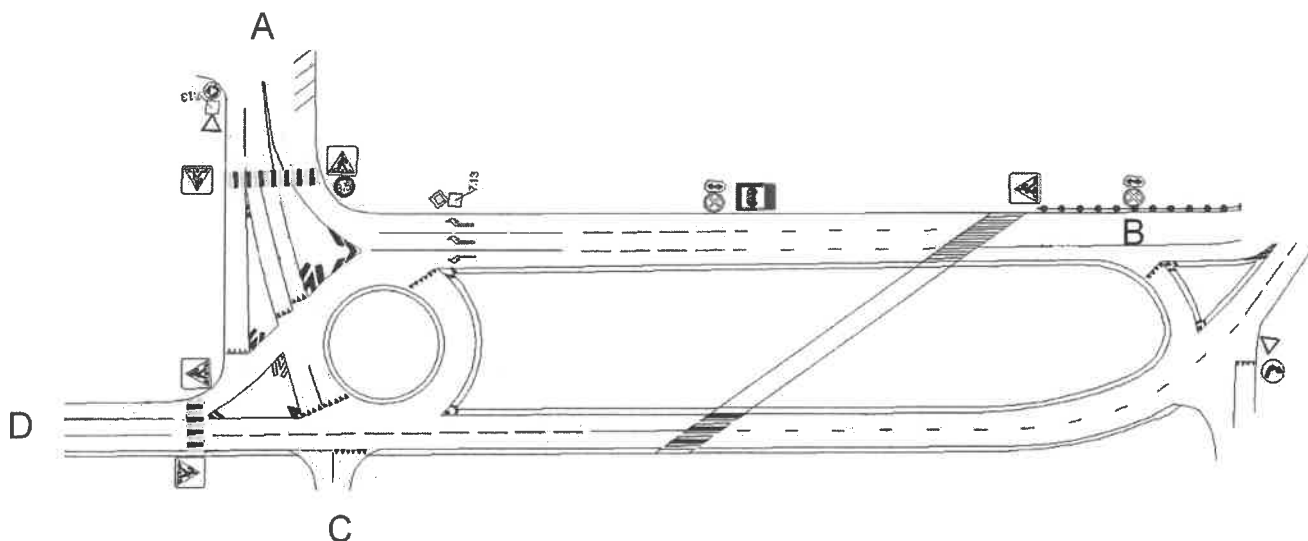


Рисунок 1 – Существующая схема ОДД на пересечении ул. Пролетарской – пл. Ленина – пр. Ленина в г. Гомеле

Обследования интенсивностей транспортных и пешеходных потоков на пересечении ул. Пролетарской – пл. Ленина – пр. Ленина производились путем подсчета количества ТС, подъезжающих с каждого входа на пересечение, и пешеходов, движущихся в каждом направлении на каждом пешеходном переходе. Подсчет велся с файлов видеозаписей, сделанных по дням и на протяжении периодов времени в соответствии с действующими на ул. Советской программами координации (ПК):

- в будний день: 7–8, 8–9, 12–13, 13–14, 17–18, 18–19;
- в выходной день: 12–13, 13–14, 15–16, 16–17.

Количество учетчиков, а также места их расположения при видеозаписи потоков определялись при предварительном осмотре объекта исследования. Продолжительность измерений – 10 мин в течение каждого часа. Полученные десятиминутные интенсивности приводились к часовым путем умножения на 6 (количество десятиминутных интервалов в течение часа) и делением на 0,92 (коэффициент внутрисуточной неравномерности) [5].

Для достижения цели данной публикации использовалась модель ул. Советской, созданная в программной среде Transyt-7FR [6]. К указанной модели добавлен рассматриваемый транспортный узел, актуальные интенсивности транспортных и пешеходных потоков на нем и смоделировано его функционирование при существующей схеме ОДД. После такого моделирования работы получено, что суммарная годовая стоимость экономических потерь транспортных и пешеходных потоков при текущей схеме ОДД составляет 140 тыс у.е./год. При расчете величины стоимости потерь учитывались:

– стоимость одной остановки ТС (0,015 у.е./ост.) [7]. В стоимости одной остановки учтены потери времени на разгон-торможение, перерасход топлива при трогании и торможении, дополнительный износ двигателя, шин и др., потери прибыли потребителями;

– стоимость одного часа задержки ТС (1,8 у.е./авт·ч) [7]. В стоимости одного часа задержки учтены амортизационные расходы, эксплуатационные расходы, задержка водителя и одного пассажира, расход топлива, потери прибыли потребителями.

Для повышения эффективности дорожного движения на пересечении ул. Пролетарской – пл. Ленина – пр. Ленина предложена новая схема ОДД на данном объекте (рисунок 2).

Указанная схема предусматривает:

- отмену пешеходного перехода через площадь Ленина;
- введение светофорного регулирования на пешеходном переходе через проспект Ленина;
- введение светофорного регулирования на пешеходном переходе через ул. Пролетарскую;
- отнесение левых поворотов для ТП DA и BB.

Предлагаемая схема ОДД была учтена в созданной в программной среде Transyt-7FR модели. Также в модель были добавлены расположенные на пересечении ул. Пролетарской – пл. Ленина – пр. Ленина остановочные пункты маршрутных ТС. Кроме того, были учтены следующие требования к параметрам светофорного регулирования на пересечении ул. Пролетарской – пл. Ленина – пр. Ленина.

1 Схема пофазного разъезда (рисунок 3). При ее проектировании учитывалась допустимость конфликтов. При этом допустимыми считались следующие конфликты:

- «левоповоротный транспорт – транзитный транспорт» – если интенсивность левоповоротного потока до 120 авт./ч;
- «правоповоротный транспорт – пешеходы» – если интенсивность транспорта до 120 авт./ч и пешеходов до 900 чел./ч;
- конфликт «поворотный транспорт – поворотный транспорт» – при интенсивности до 400 авт./ч.

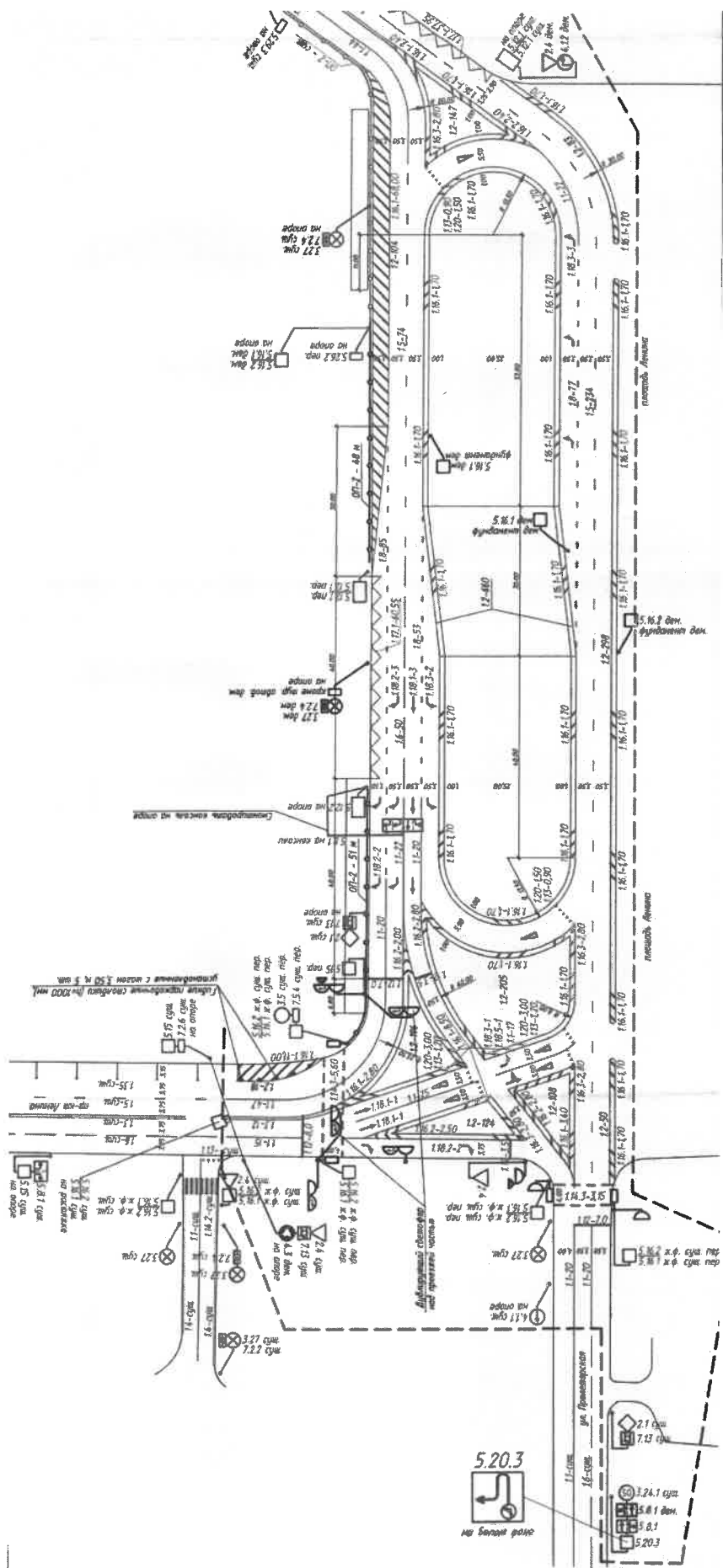


Рисунок 2 — Предлагаемая схема ОДД на пересечении ул. Пролетарской — пл. Ленина — пр. Ленина

2 При группировании потоков также придерживались следующих положений:

- стремиться к минимальному числу фаз в цикле;
- стремиться к относительно равномерной загрузке всех полос;
- не выпускать из одной и той же полосы ТП, движение которых предусмотрено в разных фазах.

3 Значения переходных интервалов для ТП, рассчитанные по методике [5] с соблюдением требований [8].

4 Значения переходных интервалов для пешеходных потоков, рассчитанные в соответствии с п. 10.8.5 [8] минимум:

- 17 сек для пешеходов, движущихся в фазе I;
- 9 сек для пешеходов, движущихся в фазе II.

5 Существующие в настоящее время по ул. Советской продолжительности циклов СФР для каждой ПК.

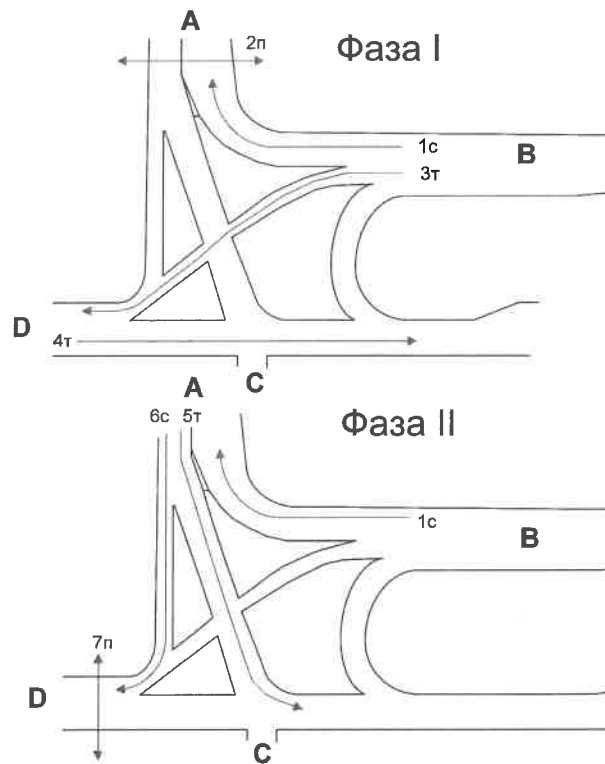


Рисунок 3 – Предлагаемая на пересечении ул. Пролетарской – пл. Ленина – пр. Ленина схема пофазного развязки

При оптимизации параметров КР в качестве функции оптимизации было задано отношение $PROS/DI$ [1, 2]. $PROS$ – это критерий, характеризующий способность ТП следовать через несколько перекрестков подряд без остановок. Другими словами, $PROS$ является показателем «Зеленой волны» [1, 2]. Показатель невыгодности (DI) – параметр, который служит мерой неблагоприятных для дорожного движения ($ДД$) операций. Он включает в себя такие показатели, как повышенный расход топлива, заторы, эксплуатационные расходы и задержки [1, 2]. Таким образом, оптимизация по критерию $PROS/DI$ позволяет сочетать преимущества максимизации $PROS$ и минимизации DI . В ходе выполнения процедуры в программной оболочке подсчитывается эффективное $PROS$ для магистрали и DI для системы в целом после каждого изменения расписания. Изменение сохраняется, если оно влечет повышение значения $PROS/DI$. В отличие от простого варианта $PROS$ -оптимизации в данном случае $PROS$ и DI рассматриваются одновременно, что исключает потребность во втором шаге оптимизации, описанном выше, для целевой функции $PROS/DI$.

Поскольку при подсчете DI принимаются во внимание второстепенные направления, помимо смещений

можно оптимизировать и длительности фаз. Программной средой предпринимается попытка максимизировать возможность беспрепятственного движения, сохраняя при этом достаточную долю времени зеленого сигнала для второстепенных направлений. Помимо того, программа ищет такие значения смещений, которые обеспечивают разгрузку существующей очереди до прибытия очередной транспортной группы. Узлы, не принадлежащие указанной магистрали, рассматриваются с привлечением стандартной процедуры расчета DI . Поэтому их смещения и длительности фаз оптимизируются с учетом беспрепятственного движения по магистрали.

В качестве метода оптимизации выбран генетический алгоритм. Такие алгоритмы предназначены для решения задач оптимизации и моделирования путем последовательного подбора, комбинирования и вариации искоемых параметров с использованием механизмов, напоминающих биологическую эволюцию, что позволяет получать лучшие результаты по сравнению с классическими методами оптимизации.

В итоге оптимизации параметров светофорного кординированного регулирования были получены ПК, графики безостановочного движения, сдвиги включе-

ния разрешающих сигналов и циклы светофорного регулирования (СФР) на пересечении ул. Пролетарской – пл. Ленина – пр. Ленина в г. Гомеле для каждого ПК.

По результатам моделирования установлено, что введение координированного светофорного регулирования позволит сократить годовую стоимость экономических потерь транспортных и пешеходных потоков до 115 тыс у.е./год. То есть экономический эффект от реализации предложенной схемы ОДД составит 25 тыс у.е./год.

Заключение и выводы.

На основании моделирования работы площади Ленина г. Гомеля получено, что при существующей схеме ОДД суммарная стоимость годовых потерь составляет 140 тыс у.е./год. Также предложены для данного объекта новая схема ОДД, параметры светофорного регулирования, сдвиги включения разрешающих сигналов для каждой ПК, схема пофазного разъезда. Реализация таких предложений позволит снизить годовую величину экономических потерь транспортных и пешеходных потоков на 25 тыс у.е./в год.

Список литературы

- 1 ArteryLite. Руководство пользователя. – 101 с.
- 2 Transyt-7FR. Руководство пользователя (русская версия). – 508 с.

3 Аземша, С. А. Совершенствование схемы организации дорожного движения на площади Ленина в г. Гомеле / С. А. Аземша, В. Е. Саламонова, О. Н. Шуст // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2020. – № 2 (41). – С. 31–36. – EDN KIPSRL.

4 Саламонова, Е. В. Совершенствование схемы организации дорожного движения на площади Ленина в г. Гомеле / Е. В. Саламонова, О. Н. Шуст, С. А. Аземша // Транспорт: проблемы, цели, перспективы (transport 2021) : материалы II Всероссий. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Пермь, 12 февраля 2021 года / под ред. Е. В. Чабановой. – Пермь : ВГУВТ, 2021. – С. 489–495. – EDN UIKHFX.

5 Методические рекомендации по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения. Организация дорожного движения на регулируемых пересечениях. – М., 2017.

6 Расчет параметров координированного регулирования светофорными объектами по ул. Советская в г. Гомеле / Ч. 2 Моделирование функционирования светофорных объектов при существующих параметрах координации : отчет о НИР по договору 2/1943 от 14 июля 2021 г. Белорус. гос. ун-т трансп., Гомель, 2021. – 69 с.

7 Врубель, Ю. А. Организация дорожного движения / Ю. А. Врубель. – Минск : БНТУ, 2006 г. – 178 с.

8 СТБ 1300. Технические средства организации дорожного движения. Правила применения. – Введ. 2016-01-01. – Минск : Госстандарт, 2014. – 137 с.

Получено 05.03.2024

S. A. Azemsha. Improving the efficiency of road traffic on Lenin square in Gomel city.

The quality of traffic management in large urban squares is important to ensure safety, improve accessibility and reduce traffic losses. Well-designed infrastructure and traffic management contribute to a more efficient use of urban spaces, provide convenience for pedestrians and cyclists, and help reduce emissions of harmful substances into the atmosphere. In addition, well-organised traffic contributes to improving the overall comfort level of city dwellers and creating a favourable urban environment for living and recreation, which in turn provides prerequisites for the development of the city's economy by improving transport infrastructure and ensuring more efficient functioning of urban life.

This article is devoted to the problem of improving the efficiency of traffic on Lenin Square in the city of Gomel. The article considers modern methods of improving the organisation of traffic flow, optimising the infrastructure and improving road safety in this area. The authors offer a comprehensive approach to solving the problem, including analysis of existing problems, development of innovative solutions and practical recommendations to improve the situation on Lenin Square using a package of applied software for traffic simulation. The results and conclusions presented in the article can be useful both for specialists in the field of urban development and transport planning, as well as for local authorities and public organisations interested in improving road infrastructure and ensuring road safety in the city.

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ

УДК 629.4.015

*П. А. САХАРОВ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель***ПРОДОЛЬНАЯ ДИНАМИКА ОДНОРОДНЫХ ПО МАССЕ ПОЕЗДОВ ПРИ ДВИЖЕНИИ ЧЕРЕЗ ПЕРЕЛОМЫ ПРОФИЛЯ ПУТИ В РЕЖИМЕ ХОЛОСТОГО ХОДА**

Исследованы продольные силы в межвагонных соединениях поезда, движущегося через переломы продольного профиля пути в режиме холостого хода. Оценено влияние разности уклонов смежных элементов профиля пути и кривизны их сопряжения на величину и распределение максимальных сил в автосцепках вагонов. Представлены зависимости максимальных сил в поезде от массы состава и величины перелома продольного профиля пути.

С увеличением массы и длины поездов, а также скорости их движения всё большую актуальность обретает вопрос оценки влияния переломов профиля пути, то есть разности уклонов смежных элементов, на продольно-динамические силы между вагонами и, как следствие, на безопасность движения. Согласно исследованиям [1] в поездах массой более 7000–8000 т сжимающие силы, возникающие на переломах профиля пути, могут превышать 250–300 кН. Они могут послужить причиной выжимания порожних четырехосных вагонов из рельсовой колеи, особенно в кривых участках, где допустимыми считаются силы до 300 кН [2, 3]. В случае движения через перелом профиля пути в режиме торможения наибольшие сжимающие силы могут превысить 500 кН. Действие таких сил небезопасно для порожних вагонов даже в прямых участках пути.

Согласно [4] максимальные продольные силы в поезде при экспертизах крушений и аварий обычно находились в пределах 200–400 кН, что меньше допускаемых значений. Авторами статьи [4] отмечается, что указанные допускаемые продольные силы являются предельными лишь по условиям выжимания вагонов в голове поезда при исправном подвижном составе и пути. При наличии неисправностей, в зависимости от их сочетания, сходы подвижного состава с рельсов происходят при значительно меньших значениях продольных сил.

Наименьшей устойчивостью от выжимания обладают вагоны с небольшими значениями массы тары, длин по осям сцепления автосцепок и колесной базы [5]. Исследования [6] показали, что на устойчивость движения порожних вагонов и устойчивость колеса против схода с рельсов в различной степени влияют такие отклонения от нормативного состояния экипажа, как перекося осей колесных пар, разность диаметров колес, завышение клиньев рессорного подвешивания, зазоры в скользунах, разности уровней осей автосцепок. К существенному снижению устойчивости приводит прокат на колесах. Так для вагонов на тележках модели 18–100 с появлением на колесах проката 2–3 мм повышается частота извилистого движения колесной пары, приближаясь к частоте боковой качки кузова. При скоростях движения более 60–70 км/ч интенсивные колебания виляния и боковой качки вагона приводят к обезгрузке пружин и колесных пар. В этом слу-

чае даже небольшие продольные силы, в том числе вызванные движением через перелом профиля пути, могут привести к сходу вагона с рельсов [6, 7].

Значения продольных сил в межвагонных соединениях поезда, движущегося через перелом профиля пути в режиме выбега, зависят от многих факторов, основными из которых являются параметры пути (значения уклонов и сопрягающих кривых), масса и схема формирования состава, начальное состояние автосцепных устройств (сжаты они или растянуты). В работе [8] рассмотрено влияние указанных факторов на продольную динамику поезда с помощью линейного и пространственного моделирования. Сделан вывод, что при учете пространственных колебаний расчетные значения сжимающих и растягивающих сил в межвагонных соединениях больше, чем при отсутствии такого учета, то есть полученных с помощью линейной модели.

Оценка продольных усилий в тяжеловесных и длинносоставных грузовых поездах выполнена в работах [9, 10, 11]. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что неоднородность состава по типу вагонов приводит к росту продольных усилий на 20 %, а неоднородность их по загрузке – на 30–35 % [9]. При этом на результаты моделирования оказывают влияние не только характеристики поглощающих аппаратов, но и используемые алгоритмы их математического описания [10]. Отмечается, что наличие зазоров и увеличение их значений в автосцепках приводит к увеличению продольных сил и усталостных повреждений узлов [11].

Анализ случаев схода порожних вагонов в кривых участках пути [12] показал, что сход возможен как наружу, так и внутрь кривой. Основная часть сходов приходится на режимы выбега (58 %) и тяги (37 %). Установлено, что основной причиной схода внутрь кривой является одновременное сочетание разгрузки колеса первой по ходу движения колесной пары и увеличение бокового усилия, а схода наружу – выжимание вагонов и вкатывание колеса на головку рельса. Последние чаще всего происходят в средней части поезда на уклоне продольного профиля пути. При этом в подавляющем большинстве случаев сход происходит при отсутствии очевидных нарушений [12].

Таким образом, очевидна необходимость исследования влияния переломов продольного профиля пути

на величину и распределение сил в межвагонных соединениях поездов.

Для оценки продольной динамики поезда разработана компьютерная модель. Ее математическое описание, реализация в компьютерном комплексе MSC.Adams и результаты верификации представлены в работе [13]. С помощью указанной модели выполнена оценка силового взаимодействия вагонов в составе поезда, движущегося через переломы продольного профиля пути в режиме выбега. Согласно [13] значения продольных сил, возникающих в межвагонных соединениях в процессе движения через перелом профиля пути (с элемента крутизной i_1 , на элемент крутизной i_2), зависят от разности уклонов смежных элементов

$$\Delta i = i_2 - i_1. \quad (1)$$

При движении поезда с площадки на спуск, со спуска меньшей крутизны на спуск большей крутизны, с подъема на площадку имеем отрицательный перелом профиля. В этом случае в поезде возникают растягивающие силы. При положительном переломе профиля (движение с площадки на подъем, с подъема меньшей крутизны на подъем большей крутизны, со спуска на площадку) в межвагонных соединениях возникают сжимающие силы.

Поскольку значения продольных сил определяются величиной перелома профиля и не зависят от уклона элемента i_1 , с которого поезд начинает движение, в расчетах рассмотрены два варианта профиля пути: схема 1 – при движении поезда с площадки ($i_1 = 0$) на спуск крутизной i_2 с радиусом сопрягающей кривой R ; схема 2 – при движении поезда с площадки ($i_1 = 0$) на подъем крутизной i_2 с радиусом сопрягающей кривой R .

При неустановившихся режимах движения, характеризующихся быстрым изменением энергетического состояния поезда вследствие соответствующего изменения силы тяги или торможения, существенное влияние на продольно-динамические силы оказывают характеристики поглощающих аппаратов вагонов. Увеличение демфирующих свойств последних способствует снижению сил в межвагонных соединениях при переходных процессах. Однако при движении через перелом профиля пути внутренние силы в поезде изменяются достаточно медленно и влияние характеристик поглощающих аппаратов на их значения не столь значительно. Для подтверждения данного утверждения выполнены расчеты.

Рассмотрено движение однородного по массе поезда через перелом профиля 5 ‰ (в соответствии со схемой 1 – с площадки на подъем $i_2 = 5$ ‰ при радиусе сопрягающей кривой $R = 10$ км). Поезд сформирован по схеме 1, представленной на рисунке 1 (обозначения на рисунке: q_n – масса локомотива; n – число вагонов в составе; q_i – масса i -го вагона). Здесь и далее в расчетах длина вагонов и двухсекционного локомотива по осям автосцепок составляет 13,92 и 38,15 м соответственно, а начальная скорость движения поезда 80 км/ч.

Рассмотрены случаи, при которых все вагоны оборудованы одним из трех типов поглощающих аппаратов, математическое описание силовых характеристик которых определяется расчетными выражениями:

– для аппаратов первого типа

$$T_1 = \begin{cases} 2 \cdot 10^7 h + 10^5 v, & hv \geq 0; \\ 2 \cdot 10^7 h + 10^4 v, & hv < 0, \end{cases} \quad (2)$$

где h – величина сжатия поглощающего аппарата, м; v – скорость сжатия поглощающего аппарата, м/с;

– для аппаратов второго типа

$$T_2 = \begin{cases} 2 \cdot 10^7 h + 10^5 v, & hv \geq 0; \\ 5 \cdot 10^6 h, & hv < 0; \end{cases} \quad (3)$$

– для аппаратов третьего типа

$$T_3 = \begin{cases} 2 \cdot 10^7 h + 10^5 v, & hv \geq 0; \\ 0, & hv < 0. \end{cases} \quad (4)$$

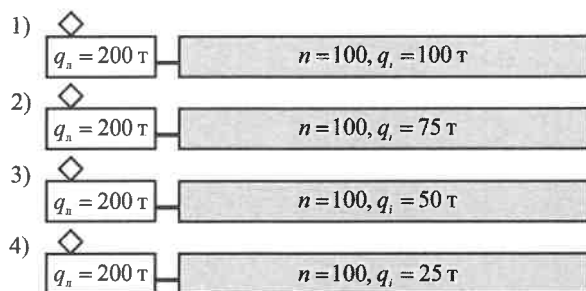


Рисунок 1 – Схемы формирования составов однородных по массе поездов

Динамические силовые характеристики указанных поглощающих аппаратов, полученные путем моделирования соударения двух вагонов массой 100 т при скорости набегающего вагона 11 км/ч, представлены на рисунке 2. Максимальная сила незначительно превышает значение 2 МН при энергоемкости около 110 кДж, что соответствует требованиям, предъявляемым к поглощающим аппаратам класса T2 [14].

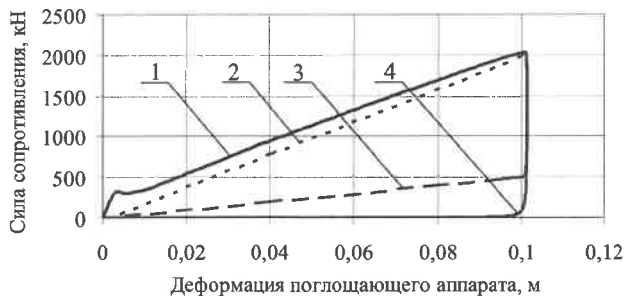


Рисунок 2 – Силовые характеристики поглощающих аппаратов:

1 – линия нагружения для всех аппаратов; 2 – линия разгрузки аппаратов первого типа; 3 – линия разгрузки аппаратов второго типа; 4 – линия разгрузки аппаратов третьего типа

Представленные силовые характеристики отличаются только линией разгрузки, а соответствующие им поглощающие аппараты – способностью преобразовывать воспринятую энергию в тепло. Коэффициент необратимого поглощения энергии аппаратов первого типа не превышает 10 %, для второго типа – составляет около 75 %, а для третьего – близок к 100 %.

С использованием указанных исходных данных выполнено моделирование описанного выше варианта движения поезда через перелом профиля пути в режиме холостого хода. Графики изменения максимальных

сжимающих сил, возникающих в процессе движения в межвагонных соединениях, представлены на рисунке 3. Поезд преодолевает перелом профиля пути за 70–75 с, его скорость движения при этом снижается с 80 до 70 км/ч.

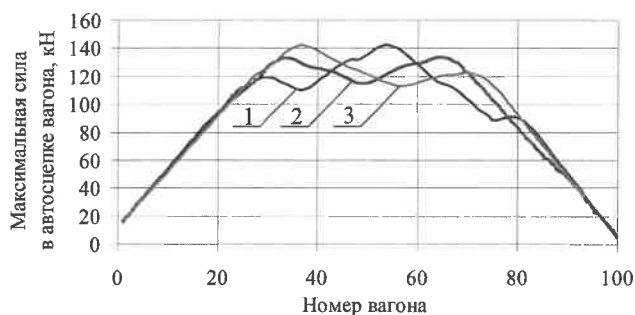


Рисунок 3 – Распределение максимальных сил в поезде, оборудованном поглощающими аппаратами: 1 – первого типа; 2 – второго типа; 3 – третьего типа

Представленные результаты подтверждают сделанное ранее предположение, что демпфирующие свойства поглощающих аппаратов оказывают незначительное влияние на максимальные силы, возникающие в поезде в ходе его движения через перелом профиля пути в режиме холостого хода. Данное утверждение справедливо для случаев, в которых зазоры в межвагонных соединениях отсутствуют или не проявляются. Влияние зазоров на максимальные силы в поезде требует дополнительных исследований. Стоит отметить, что увеличение демпфирующих свойств в поглощающих аппаратах вагонов приводит к увеличению амплитуды продольных колебаний, а также к изменению расположения максимумов сжимающих сил по длине поезда. Так при оборудовании вагонов аппаратами первого типа с минимальными демпфирующими свойствами максимальная сила возникает между 53-м и 54-м вагонами и составляет 142,6 кН (рисунок 3). При аппаратах второго типа наблюдается два близких по значению максимума сил (около 134 кН) в автосцепках 34-го и 65-го вагонов. При аппаратах третьего типа наибольшая сила достигает 142,2 кН в сцепках 37-го вагона.

Таким образом, увеличение коэффициента необратимого поглощения энергии в поглощающих аппаратах при неизменной характеристике их нагружения не оказывает существенного, однозначно проявляющегося влияния на снижение максимальной силы, возникающей в поезде при движении через перелом профиля пути. Наибольшее снижение максимальной силы наблюдалось при коэффициенте поглощения энергии 75 % и составило около 6 % (8,6 кН). Однако при этом близкие по значению максимумы возникли в двух точках поезда, а не в одной, как при других значениях коэффициента поглощения энергии. Таким образом, сделать однозначный вывод о снижении продольной нагруженности поезда на переломах профиля пути с увеличением демпфирующих свойств поглощающих аппаратов не представляется возможным. В этой связи для упрощения и уменьшения объема расчетов в дальнейших исследованиях рассмотрены случаи оборудования поездов поглощающими аппаратами только первого типа.

Выполнена оценка продольных сил в поезде при движении на холостом ходу через положительный и отрицательный перелом профиля пути. Рассмотрено движение с площадки на спуск -5% и с площадки на подъем 5% (в соответствии со схемами 1 и 2 при $R = 5$ км). Характеристики поезда и начальные условия его движения приняты такими же, как в предыдущем исследовании. Результаты расчетов представлены на рисунке 4.

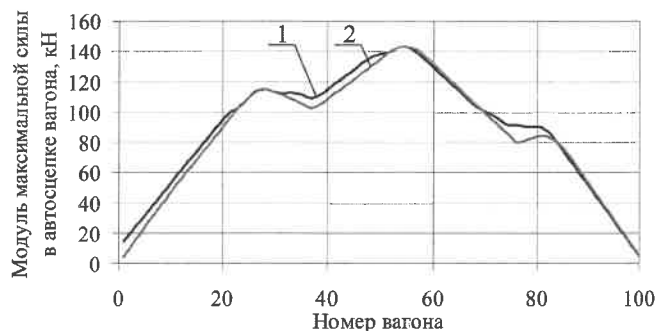


Рисунок 4 – Распределение максимальных сил в поезде, движущемся в режиме выбег через перелом 5% : 1 – с площадки на подъем; 2 – с площадки на спуск

За рассмотренный отрезок времени 70 с скорость поезда, движущегося с площадки на подъем, снизилась с 80 до 70 км/ч. Скорость движущегося на спуск поезда снижалась в течение 25 с до момента, когда силы от уклона профиля уравновесили силы основного сопротивления движению. Далее скорость увеличивалась, достигнув по истечении рассматриваемого отрезка времени значения 82 км/ч. В обоих случаях поезд преодолел перелом профиля пути, включая сопрягающую смежные элементы профиля пути кривую. По результатам расчетов видно, что изменение длины и продольные силы в рассматриваемых поездах по абсолютному значению отличаются несущественно. При этом при движении на подъем в поезде возникают сжимающие силы и соответствующее уменьшение его длины, а при движении на спуск – силы растяжения и увеличение длины. Полученные результаты подтверждают сделанные ранее выводы, что для оценки продольной динамики поезда, движущегося через перелом профиля пути в режиме холостого хода, достаточно исследовать только один из вариантов движения: с площадки на подъем или с площадки на спуск [13, 15]. Указанное допущение позволяет существенно уменьшить объем исследований.

Для поезда с составом массой 10000 т, сформированного по схеме 1 (см. рисунок 1), рассмотрены варианты движения с площадки на подъем крутизной $5\text{--}15\%$ при различных радиусах R сопрягающей кривой (от 5 до 20 км). Графики распределения максимальных продольных сил по длине поезда при $R = 5$ км представлены на рисунке 5. Видно, что максимальные силы в связях вагонов изменяются пропорционально величине перелома профиля пути. Их наибольшие значения возникли в центральной части состава и составили 143,4, 283,8 и 420 кН соответственно при разности уклонов профиля 5, 10 и 15 %.

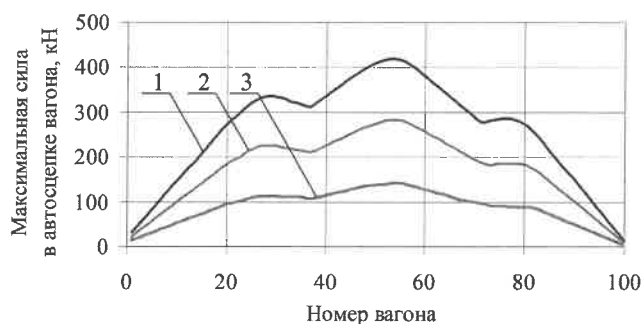


Рисунок 5 – Распределение максимальных сил в поезде, движущемся в режиме выбега через перелом:
1 – 15 %; 2 – 10 %; 3 – 5 %

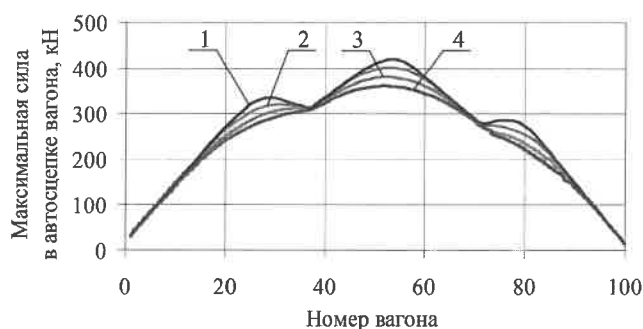


Рисунок 6 – Распределение максимальных сил в поезде, движущемся через перелом 15 % при сопрягающей кривой R :
1 – 5 км; 2 – 10 км; 3 – 15 км; 4 – 20 км

На рисунке 6 показано влияние кривизны сопрягающей элементы профиля кривой на значения максимальных продольных сил, возникающих в поезде при движении через перелом профиля пути 15 %. Увеличение радиуса кривой приводит к снижению максимальных сил. Можно выделить три области, в которых указанное снижение сил наблюдается в наибольшей степени. Первая находится между 25–30 вагонами, вторая – между 50–55 вагонами, третья – между 75–80 вагонами. Анализ результатов показал, что снижение сил вызвано снижением интенсивности собственных продольных колебаний поезда. Чем более пологий вид имеет сопрягающая элементы профиля кривая, тем меньшая амплитуда собственных продольных колебаний возникает в поезде в процессе движения. То есть скорость изменения внешней сжимающей силы с увеличением радиуса кривой при неизменной длине поезда уменьшается, что приводит к снижению возникающих в поезде колебаний и сил в его связях в моменты максимального сжатия. Так, в рассматриваемом случае период собственных колебаний поезда составляет около 20 с, поэтому на 21, 39 и 58-й секундах возникли максимумы сжатия поезда. Максимумы отчетливо проявляются на графиках с радиусом сопряжения 5 и 10 км. При больших радиусах сопряжения поезд сжимается плавно без видимых интенсивных колебаний с единственным максимумом на 45 с для случая движения через перелом профиля с $R = 20$ км.

Аналогичные расчеты выполнены для поездов с составами массой 2500–7500 т, сформированными по схемам 2–4 на рисунке 1. При указанных массах состава распределение продольных сил по длине поезда при различных значениях разности уклонов смежных

элементов профиля и кривизны их сопряжения имеет такой же вид, как на рисунках 5 и 6. Максимальные силы в межвагонных соединениях при этом имеют меньшие значения, снижаясь пропорционально массе поезда. На рисунке 7 представлены зависимости максимальных сил в поезде от величины перелома профиля и массы состава при радиусах сопрягающих кривых 5 и 20 км. С их помощью путем интерполяции можно определять приблизительное значение максимальной силы, возникающей в движущемся на холостом ходу через перелом профиля пути поезде. По графикам видно, что с увеличением разности уклонов возрастает влияние кривизны сопрягающей элементы профиля кривой.

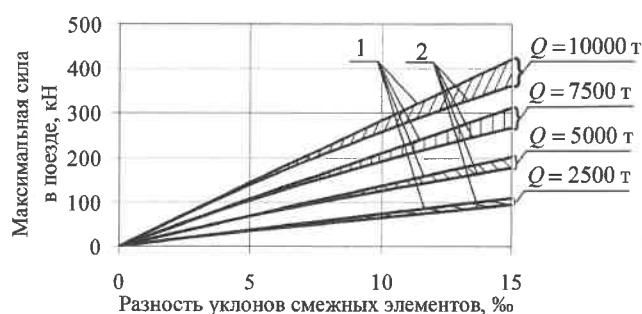


Рисунок 7 – Зависимости максимальных сил в поезде от величины перелома профиля и массы состава при R :
1 – 5 км; 2 – 20 км

Выполненные исследования показали, что при движении поезда через перелом профиля пути в режиме холостого хода в его межвагонных соединениях возникают сжимающие (или растягивающие) силы, пропорциональные массе поезда и разности уклонов смежных элементов. При этом для их определения достаточно исследовать только один из вариантов движения: с площадки на подъем или с площадки на спуск крутизной i . Для представленных условий движения показана незначительность влияния демпфирующих свойств свойств поглощающих аппаратов на значение максимальной силы в поезде. Определены зависимости, позволяющие найти максимальную силу в поездах массой до 10000 т, движущихся через перелом профиля до 15 % при сопрягающих кривых радиусом до 20 км.

Полученные результаты следует учитывать для обеспечения безопасности ведения поездов через переломы продольного профиля пути на различных режимах движения поезда.

Список литературы

- 1 Shimanovsky, A. Investigation of the longitudinal track profile influence on the forces acting in the train inter-car connections using the MSC.ADAMS software / A. Shimanovsky, P. Sakharau // CEUR Workshop Proceedings. – 2019. – Vol. 2353. – P. 555–569.
- 2 Методические указания по выполнению тяговых расчетов: утв. приказом главного инженера Бел. ж. д. от 11 нояб. 2021 г., № 949НЗ. – Минск, 2021. – 265 с.
- 3 Правила тяговых расчетов для поездной работы: утв. распоряжением ОАО «РЖД» № 867р от 12.05.2016 г. – М.: ОАО «РЖД», 2016. – 515 с.

- 4 **Крючкова, Ю. В.** Исследование устойчивости вагонов против схода при движении по сложным участкам дороги / Ю. В. Крючкова, И. Ю. Ермоленко // Молодая наука Сибири : электрон. науч. журн. – 2018. – № 1(1). – С. 1–5.
- 5 Некоторые аспекты определения устойчивости порожних вагонов от выжимания их продольными силами в грузовых поездах / А. А. Швец [и др.] // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. – 2015. – № 4. – С. 175–189.
- 6 **Коссов, В. С.** Факторы устойчивости порожних вагонов / В. С. Коссов, В. В. Березин, В. А. Быков // Мир транспорта. – 2012. – № 2. – С. 168–177.
- 7 **Ромен, Ю. С.** Устойчивость движения вагонов на тележках 18-100 / Ю. С. Ромен // Вестник ВНИИЖТ. – 2019. – Т. 78, № 3. – С. 149–154.
- 8 **Ковтун, Е. Н.** Моделирование пространственных колебаний поезда, движущегося по переломам продольного профиля пути / Е. Н. Ковтун, В. В. Малый, О. М. Маркова // Техническая механика. – 2019. – № 3. – С. 77–87.
- 9 **Бубнов, В. Ю.** Уменьшение продольных усилий в автосцепках вагонов при движении тяжеловесных и длинноставных грузовых поездов : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / В. Ю. Бубнов; Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – СПб., 2006. – 24 с.
- 10 Influence of Draft Gear Modeling on Dynamics Simulation for Heavy-Haul Train / C. Lei [et al.] // Shock and Vibration. – 2019. – Vol. 2019. – P. 1–11.
- 11 **Cole, C.** Simulated comparisons of wagon coupler systems in heavy haul trains / C. Cole, Y. Q. Sun // Journal of Rail and Rapid Transit. – 2006. – Vol. 220, no. 3. – P. 247–256.
- 12 **Николаев, В. А.** Причины схода порожнего подвижного состава на Красноярской и Восточно-Сибирской железных дорогах / В. А. Николаев, Е. П. Капустина, Е. Г. Леоненко // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 1. – С. 47–53.
- 13 **Сахаров, П. А.** Повышение безопасности движения поезда при использовании электродинамического торможения : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / П. А. Сахаров; Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель, 2022. – 23 с.
- 14 Аппараты поглощающие сцепных и автосцепных устройств железнодорожного подвижного состава. Технические требования и правила приемки: ГОСТ 32913-2014. – Введ. 2015.06.01. – М. : Стандартинформ, 2015. – 9 с.
- 15 **Сахаров, П. А.** Исследование продольных сил в грузовых поездах при движении по переломам продольного профиля пути / П. А. Сахаров // Механика. Исследования и инновации. – 2018. – Вып. 11. – С. 209–219.

Получено 01.04.2024

P. A. Sakharau. Longitudinal dynamics of trains homogeneous by mass at their movement at the idle mode through the track profile with changing slope.

The longitudinal forces in the inter-car connections of the train are investigated for the case of its movement at the idle mode through the track profile with changing slope. The influence of the difference in the track profile adjacent elements slopes and of their interface curvature on the magnitude and distribution of maximum forces in automatic couplers of railcars is estimated. The dependences of the maximal forces in the train on the train mass and the magnitude of the track longitudinal profile slope changes are presented.

УДК 629.4: 620.179.1

А. Г. ОТОКА, аспирант, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель; А. С. МАРТЫШОВ, Белорусская железная дорога, г. Гомель; Л. В. ОГОРОДНИКОВ, аспирант, О. В. ХОЛОДИЛОВ, доктор технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ОСОБЕННОСТИ ВИБРАЦИОННОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ КОЛЁСНО-МОТОРНЫХ БЛОКОВ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ СЕРИИ ЭР9 ПРИ ТЕКУЩЕМ РЕМОНТЕ

Рассматривается технология вибрационного диагностирования подшипников качения колёсно-моторных блоков электропоездов серии ЭР9 при текущем ремонте. Показана проблематика диагностирования, связанная с субъективным фактором, который определяется квалификацией работника и стажем его работы. Предложены методы повышения достоверности диагностической информации, получаемой после обработки вибросигналов.

В настоящее время вибрационному контролю колёсно-моторных блоков (КМБ) на железнодорожном транспорте уделяется особое внимание, поскольку своевременное предупреждение зарождающихся дефектов значительно повышает безопасность движения поездов, сокращает вероятность внеплановых видов ремонта, а также затраты на выполнение планового технического обслуживания и текущего ремонта.

Введение.

Вибрационное диагностирование подшипников качения моторвагонного подвижного состава является частью технологий ремонта МВПС и предназначено для своевременного выявления дефектов, указанных в нормативной и/или конструкторской (ремонтной, эксплуатационной) документации, принятия необходимых мер по обеспечению технической и экологической безопасности железнодорожного транспорта.

Основными задачами проведения вибрационного диагностирования (ВД) являются оценка технического состояния диагностируемых подшипниковых узлов подвижного состава и определение их безотказного ресурса.

Вибрационное диагностирование – это получение информации о наличии, виде и величине типовых дефектов по вибрации путём сравнения с пороговыми значениями диагностических параметров в виде роста уровней отдельных составляющих вибрации и относительной величины их периодических флуктуаций (модуляции).

Результатами проведения ВД являются:

- обнаружение дефектов диагностируемых подшипниковых узлов;

- назначение гарантированного безотказного ресурса (пробега) для диагностируемых узлов, тыс. км (сут), до очередного планового диагностирования. При этом безотказный ресурс должен быть не меньше пробега локомотива до очередного планового ремонта либо технического обслуживания, на котором предусмотрено проведение ВД.

Состояние вопроса

Для проведения ВД должны использоваться диагностические комплексы (средства измерений и программное обеспечение), отвечающие требованиям нормативных документов.

Сегодня широкое применение при вибрационном диагностировании подшипников качения колёсно-моторных блоков электропоездов серии ЭР9 при производстве текущего ремонта получил комплекс «Вектор-2000», обеспечивающий мониторинг состояния оборудования, а также диагностику вращающихся узлов колёсно-моторных блоков (рисунок 1).

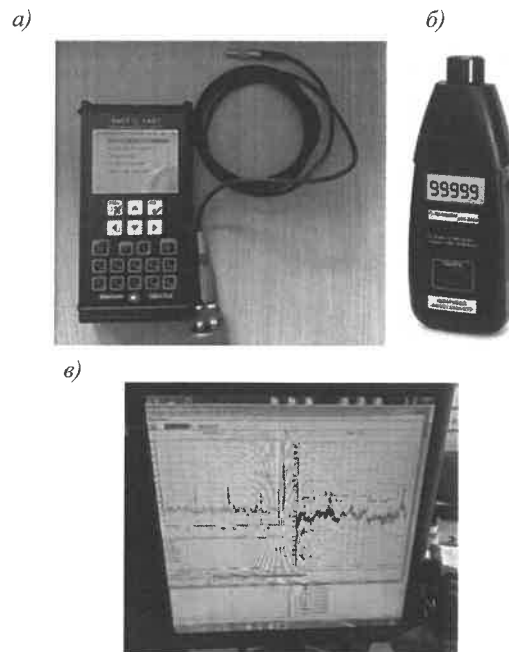


Рисунок 1 – Комплекс «Вектор-2000»:

- а – вибронализатор СД21 с вибропреобразователем АР28И;
- б – цифровой фототахометр «Актаком АТТ-6000»;
- в – ПЭВМ с прикладной программой Dream for Windows

В него входят:

- переносной цифровой анализатор сигналов (сборщик данных СД-12, СД-21);
- датчик вибрации, измеряющий виброускорение;
- датчик частоты вращения;
- персональный компьютер;
- пакет прикладных программ Dream for Windows.

По этапам проведения работ измерения делятся на основные и дополнительные. К дополнительным диагностическим обследованиям, относятся:

- вибрационное диагностирование КМБ, колёсно-редукторного блока (КРБ) со сменой направления вращения;

– вибрационное диагностирование подшипникового узла (узлов) после добавления (замены) смазки в подшипники качения, скольжения, кожух зубчатой передачи. Данные работы проводятся с целью подтверждения попадания смазки в подшипник и отсутствия других опасных дефектов. Консистентная смазка, добавленная в подшипник, а также смазка с отрицательной температурой являются демпфирующими материалами, в значительной степени снижающими уровень вибрации от возможных дефектов подшипников. В связи с этим проводить диагностические измерения допускается только при положительной температуре диагностируемого узла. Добавлять смазку в подшипники качения подвижного состава, находящегося на текущих ремонтах в объёме ТР-1, ТР-2, ТР-3 допускается только после окончательного определения состояния подшипника и наличия в нём дефектов. Допускается проводить измерения при отрицательной температуре подшипниковых узлов при условии предварительной обкатки диагностируемого узла для приработки масляного слоя в подшипнике не менее 5 мин;

– осмотр моторно-осевого подшипника (МОП), упорных буксовых подшипников со снятием крышки буксы, проверка качества крепления торцевых гаек буксовых подшипников, посадки (доступных для осмотра) внутренних колец подшипника, ревизия приводов скоростемеров, токосъёмов, упорных элементов;

– ревизия зубчатого колеса и шестерни тягового редуктора, ревизия карданных передач;

– проверка количества и качества смазки в буксовых узлах, кожухах зубчатой передачи, МОП с последующим добавлением (заменой) при необходимости;

– сравнительный анализ температуры подшипниковых узлов (после длительного, не менее 5 мин, вращения КМБ, КРБ).

Повторные диагностические измерения, проводимые в случае обнаружения ошибок при проведении

первичных измерений вибрации, не относятся к дополнительным обследованиям КМБ (КРБ).

Повторное диагностирование узлов КМБ (КРБ) необходимо проводить при вращении колёсной пары (КП) в обратную сторону после проверки и добавления (замены) при необходимости смазки в кожухи зубчатой передачи, опорные и упорные подшипники скольжения. При этом запрещается добавлять смазку в подшипник качения перед проведением их повторного диагностирования для уточнения наличия средних и сильных дефектов элементов подшипника.

Рассмотрим детально порядок выполнения работ при диагностировании.

На *первом этапе* необходимо подготовить диагностическое оборудование и подготовить электропоезд.

Подготовка диагностического оборудования включает в себя:

- а) составление маршрутной карты измерения;
- б) загрузка маршрутной карты в сборщик данных;
- в) проверка исправности соединительных кабелей, вибропреобразователей (ВП), датчика оборотов;
- г) внешний осмотр и проверка работоспособности источника питания постоянного тока;
- д) проверка домкратов на наличие течей масла и прочих неисправностей.

Подготовка электропоезда (тепловоза / электровоза) включает в себя очистку от масла и грязи мест установки ВП (датчика);

На *втором этапе* необходимо произвести вывешивание диагностируемого КМБ с помощью домкратов (рисунк 2, а). Домкраты устанавливаются на деревянные опоры высотой 380–450 мм. Домкрат устанавливают на деревянные опоры перпендикулярно центру буксы колёсной пары. Путём подъёма домкратов вывешивают КМБ на высоту не более 25 мм от головки рельса (не допускается касание головки рельса банджом колеса). После поднятия КМБ домкрат фиксируется гайкой для исключения опускания штока домкрата.

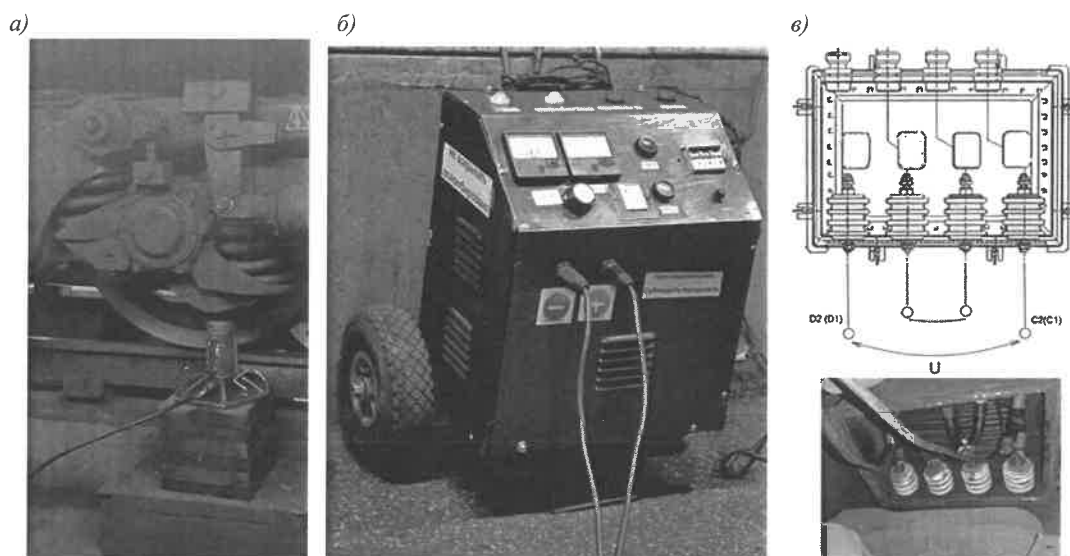


Рисунок 2 – Вывешивание диагностируемого КМБ с помощью домкратов и подключение источника питания:
а – домкрат с фиксирующей гайкой типа ДГ30П100Г; б – источник питания СПАР ИП 200А/250В;
в – подключение тягового электродвигателя к источнику питания через вводную коробку

Также необходимо подключить источник питания (рисунок 2, б) к сети переменного тока 380 В. Открывают клеммную соединительную коробку выводных кабелей от тягового электродвигателя и подключают тяговый электродвигатель к источнику питания через вводную коробку (рисунок 2, в). Работы выполняются слесарем – электриком с группой по электробезопасности не ниже 3.

На третьем этапе нужно произвести измерение уровня вибрации. Для этого необходимо нанести метку с помощью мела (рисунок 3, а) или установить светоотражающий элемент в виде полоски на торцевую часть бандажа (колёсного центра) колёсной пары. Подключить источник питания к сети переменного тока 380 В, включить автомат «Сеть», установить рукоятку потенциометра в крайнее левое положение (до упора против часовой стрелки). Нажать на кнопку «Старт» и постепенно увеличивать напряжение путём медленного вращения рукоятки потенциометра по часовой стрелке.

По мере увеличения частоты вращения колёсной пары необходимо производить замеры количества оборотов при помощи фототахометра цифрового (рисунок 3, б) либо датчика оборотов ФД-2 (диапазон вращения колёсной пары должен быть в пределах 180–300 об/мин).

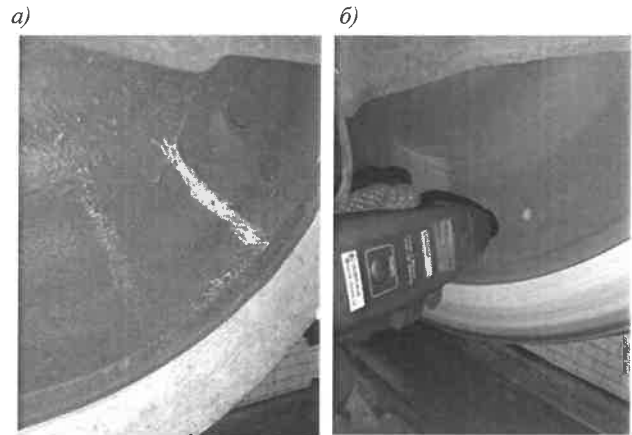


Рисунок 3 – Проведение замеров оборотов вращения колёсной пары:

- а – нанесение меловой отметки на колёсном центре;
- б – измерение частоты вращения цифровым фототахометром «Актаком АТТ-6000»

На четвертом этапе проводится непосредственно измерение по шести точкам КМБ (рисунок 4). Для этого необходимо включить сборщик данных СД-12, СД-21 и выбрать пункт «Измерение по маршруту». После чего выбрать измеряемую секцию, установить ВП (рисунок 5) на точку измерений согласно маршрутной карте, выбрать в меню пункт «Измерить».

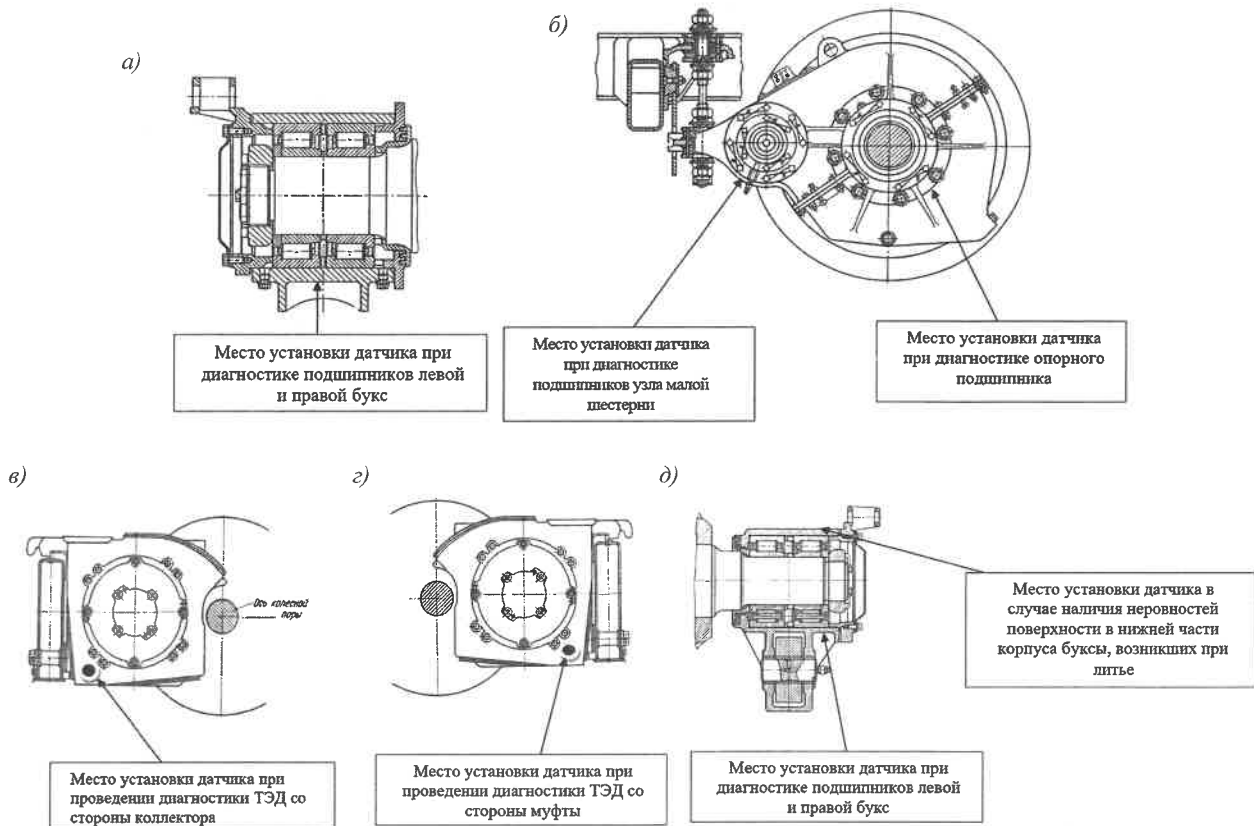


Рисунок 4 – Схема установки ВП при диагностировании:

- а – установка ВП для буксы колёсной пары моторного вагона электропоезда ЭР9Т; б – установка ВП для тягового редуктора; в – установка ВП тягового двигателя со стороны фланца; г – установка ВП для тягового двигателя со стороны коллектора;
- д – установка ВП для буксы колёсной пары моторного вагона электропоезда ЭР9Е

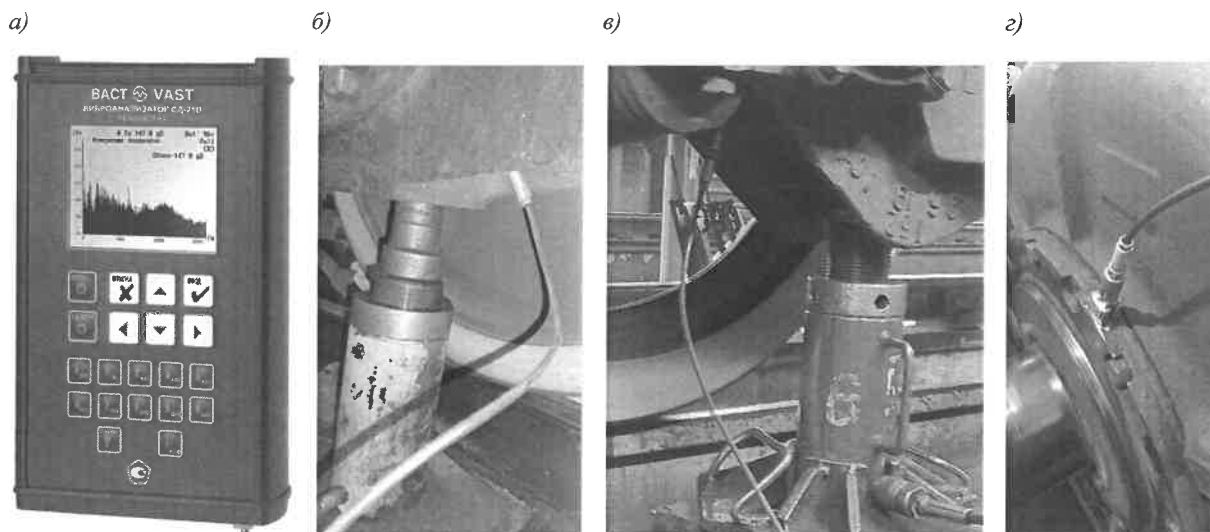


Рисунок 5 – Пример проведения ВД подшипников буксового узла:
 а – внешний вид вибронализатора СД-21В; б, в – установка ВП АР28И в нижней части корпуса буксы;
 з – место установки ВП АР28И при диагностике опорного подшипника

При диагностике электропоезда, важно считать, что КМБ № 1 находится со стороны токоприемника.

На пятом этапе после измерения всех диагностируемых точек КМБ и сохранения результатов, выключить сборщик данных. Установить рукоятку потенциометра на источнике питания в крайнее левое положение, после чего нажать кнопку «Стоп» и выключить автомат «Сеть». После полного прекращения вращения колёсной пары опустить домкраты и убрать подставки.

Отсоединить выводные провода тягового электродвигателя от проводов источника питания. Закрывать коробку клеммных кабелей.

Полученные данные загружаются в компьютер посредством интерфейса RS232, после чего производится анализ полученных данных при помощи программного обеспечения Dream For Windows.

По результатам полученной информации, специалистом (не ниже 2-го уровня квалификации по вибродиагностическому методу), производившим анализ полученных данных, принимается решение о возможности дальнейшей эксплуатации диагностируемых узлов КМБ, а также даются рекомендации по контролю узлов КМБ в дальнейшей эксплуатации.

В случае выявления недопустимых отклонений вибрации в диагностируемых узлах по показаниям программного обеспечения специалист обязан сообщить об этом начальнику участка, а также заместителю начальника депо по ремонту для принятия решения о выкатке и дальнейшем проведении комиссионного осмотра узлов КМБ, имеющих недопустимые отклонения.

По результатам выполнения вибрационной диагностики КМБ специалистом, производившим анализ данных, оформляется акт по форме, утверждённой на предприятии, который вклеивается в журнал формы ТУ-28.

Измерения вибрации должны производиться на корпусе каждого подшипникового узла в его нагруженной зоне, в вертикальном радиальном направле-

нии (с отклонением от вертикали не более 30°) при стабильной скорости вращения. Измерения следует проводить после предварительной приработки объекта диагностирования в течение 2–3 мин для приработки смазочного слоя в подшипнике.

Для всех объектов диагностирования одного типа точки и направления измерения вибрации должны совпадать. При невозможности установки датчика вибрации в нагруженной части корпуса подшипникового узла допускается установка датчика в максимально приближенном месте в радиальном направлении.

Вибрационный мониторинг – это периодическое измерение уровней (абсолютных) составляющих (в широких и / или узких полосах частот) вибрации объекта мониторинга, сравнение уровней с пороговыми значениями и определение возможных причин превышения вибрацией мониторинговых порогов.

Задачей мониторинга, по данным измерений вибрации каждого из подшипниковых узлов, является оценка состояния объектов диагностирования. Для решения данной задачи должен использоваться алгоритм сравнения каждого из измеряемых параметров виброускорения с одним или двумя пороговыми значениями. Первый порог определяет границу зоны безопасного вибрационного состояния объекта контроля, второй – зону допустимого вибрационного состояния. В случае сравнения с одним пороговым значением данное пороговое значение определяет зону безопасного вибрационного состояния.

Вибрационный мониторинг диагностируемых узлов проводится:

- по уровням гармонических составляющих вибрации в спектрах низкочастотного виброускорения подшипниковых узлов в диапазоне частот 2–500 Гц, с установкой порогов не менее чем по десяти полосам частот в спектре (рисунок 6);

- уровням случайных составляющих вибрации в спектрах низкочастотного виброускорения подшипниковых узлов в диапазоне частот 100–500 Гц, не менее, чем в трёх частотных полосах;

- уровню высокочастотной случайной вибрации в широкой полосе частот (не менее трети октавы), используемой для измерения спектра огибающей вибрации;
- уровню среднеквадратическому значению (СКЗ), пиковому значению и пик-фактору ультразвуковой высокочастотной вибрации (УВЧ).

Также мониторинг диагностируемых узлов может проводиться:

- по уровням гармонических и случайных составляющих вибрации в спектрах низкочастотного и среднечастотного виброускорения подшипниковых узлов в диапазоне частот от 5 Гц до 2,5 кГц, с установкой порогов не менее чем по десяти полосам частот в спектре;
- уровню СКЗ и значению эксцесса сигнала вибрации, измеренного в полосе от 5 Гц до 15 кГц.

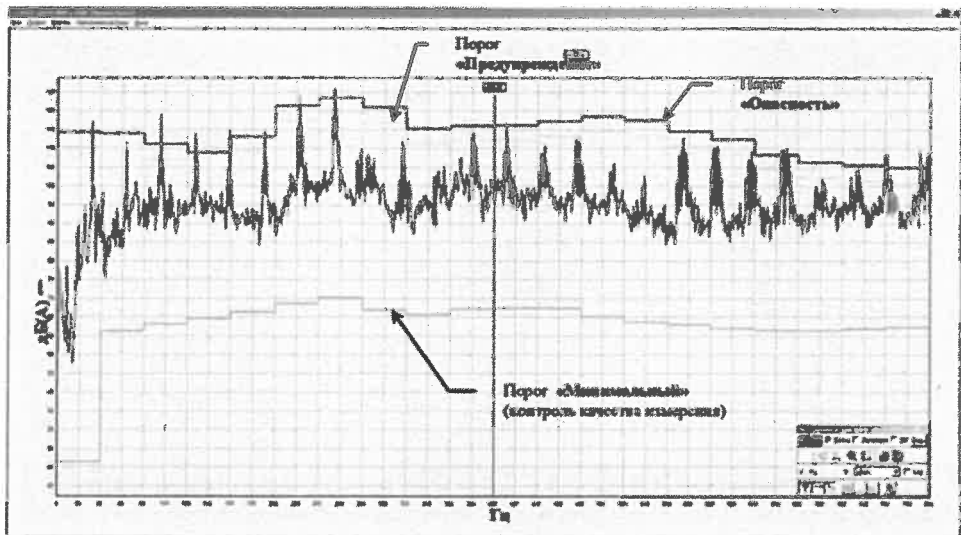


Рисунок 6 – Мониторинг уровня вибрации гармонических составляющих в спектре по пороговым значениям

Задачей диагностирования подшипников качения по данным измерений параметров вибрации каждого из подшипниковых узлов является обнаружение диагностических признаков дефектов и оценка величины каждого из диагностических параметров потенциально опасных типовых дефектов с последующим определением соответствия безаварийного ресурса подшипника его наработки (пробега) до проведения следующего вибрационного диагностирования. Для этого должен использоваться алгоритм сравнения каждого из диагностических параметров с тремя пороговыми значениями. Первый определяет зону безопасного состояния, второй – зону слабого дефекта, третий – зону среднего дефекта. Выход диагностического параметра за зону среднего дефекта означает появление сильного (опасного) дефекта.

Для обнаружения каждого из типовых дефектов должно использоваться несколько признаков его появления на основе разных физических явлений, при этом хотя бы один из используемых признаков должен быть чувствителен к появлению зарождающегося дефекта. В качестве одного из признаков для конкретного вида возможного дефекта допускается использовать отсутствие признаков других видов дефектов.

Признаки типовых дефектов подшипников делятся на три основные группы:

- определяемые ростом низкочастотной (от 2 Гц до 1 кГц) вибрации в целом, в которой диагностическими параметрами являются величины и количество подшипниковых и комбинационных гармонических составляющих вибрации, а также спектральная плотность (уровень фона) случайных составляющих;
- определяемые модуляцией среднечастотной или высокочастотной (1–15 кГц) случайной вибрации

подшипникового узла, в которых диагностическими параметрами являются глубина модуляции вибрации подшипниковых частот, их гармоник и комбинационные частоты;

- определяемые высокочастотной и ультразвуковой вибрацией подшипников, возбуждаемой периодически и непериодическими ударами в подшипниках, зубчатых зацеплениях, муфтах, карданных соединениях, в которых диагностическими параметрами являются уровень и пиковые значения вибрации на высоких (выше 10 кГц) и ультразвуковых частотах, а также глубина импульсной модуляции случайных составляющих вибрации, или уровнем СКЗ и значением эксцесса сигнала вибрации измеренного в полосе от 5 Гц до 15 кГц.

Параллельно признакам дефектов подшипников должно контролироваться появление признаков влияющих на вибрацию дефектов других узлов объекта диагностирования. К таким узлам относятся неуравновешенная колёсная пара или ротор тягового электродвигателя (ТЭД), зубчатые зацепления, моторно-осевые подшипники скольжения, упорные буксовые подшипники скольжения, муфты, используемые для вращения КМБ (КРБ), привод и т. д. При использовании в КРБ кардана необходимо дополнительно контролировать появление признаков дефектов карданных соединений и крестовин.

Диагностические признаки дефектов изготовления и монтажа могут совпадать с признаками дефектов, возникших при эксплуатации. В таблице 1 приведены признаки и параметры типовых дефектов изготовления и монтажа подшипников качения. Там же приведены диагностические признаки и параметры дефектов других узлов КМБ (КРБ), которые могут повлиять на результаты диагностирования подшипников. В таблице 2 приведены признаки дефектов эксплуатации КМБ (КРБ).

Таблица 1 – Признаки дефектов изготовления и монтажа узлов КМБ, КРБ

Дефект	Признак 1. Рост НЧ гармоник в автоспектре	Признак 2. Модуляция трения (рост)	Признак 3. Другая природа
1 Дефект изготовления наружного кольца	kf_n	kf_n	Рост ПФ
2 Дефект изготовления внутреннего кольца	$kf_{вр}, kf_в$	$kf_{вр}, kf_в$	Нет изменений ВЧ
3 Дефект изготовления тела качения	$kf_c, 2kf_{тк}$	$2kf_{тк}, kf_{тк}$ – слаб	Возможен рост ПФ
4 Дефект изготовления сепаратора	Нет изменений	kf_c , возможна НпМ	Возможен рост УО
5 Перекос наружного кольца	$2f_n$	$2kf_n > kf_n$	Рост ВЧ и/или ПФ
6 Радиальный натяг подшипника качения	Нет изменений	$2kf_{вр} > kf_{вр}$	Рост ВЧ и/или ПФ
7 Перекос сепаратора	Нет изменений	$2kf_c > kf_c$	Возможен рост УО
8 Дефект узлов крепления	Возможен рост $kf_{вр}$	НпМ, $kf_{вр} k > 3$	Рост ВЧ и/или ПФ
9 Дефект смазки подшипника качения	Нет изменений	Возможно kf_n	Рост ВЧ и/или ПФ
10 Дефект смазки моторно-осевого подшипника скольжения	Возможен рост СЧ	Возможна НпМ двух Б	Рост УО на двух подшипниках ТЭД
11 Дисбаланс ТЭД, несоосность малой шестерни	Рост $f_{вр д}$	Возможен рост $f_{вр д}$	Нет других изменений вибрации
12 Дефект зубьев малой шестерни	$kf_{вр д}, kf_z \pm k_1 f_{вр д}$	$kf_{вр д}, kf_z \pm k_1 f_{вр д}$	Возможен рост ПФ
13 Перекос малой шестерни	$2kf_{вр д}, kf_z \pm 2k_1 f_{вр д}$	$2kf_{вр д}, kf_z \pm 2k_1 f_{вр д}$	Возможен рост ПФ
14 Дисбаланс КП, несоосность большой шестерни	Рост $f_{вр к}$	Возможно $f_{вр к}$	Нет других изменений вибрации
15 Дефект зубьев большой шестерни	$kf_{вр к}, kf_z \pm k_1 f_{вр к}$	$kf_{вр к}, kf_z \pm k_1 f_{вр к}$	Возможен рост ПФ
16 Перекос большой шестерни	$2kf_{вр к}, kf_z \pm 2k_1 f_{вр к}$	$2k f_{вр к}, kf_z \pm 2k_1 f_{вр к}$	Возможен рост ПФ
17 Дефект зацепления	kf_z	Возможно $kf_{вр д}, kf_{вр к}$	Возможен рост СЧ, ПФ
18 Дефект муфты	$kf_{вр д}$	$kf_{вр д}, k > 5$	Возможен рост ПФ
19 Дефект крестовины	$4kf_{вр д}$	$4kf_{вр д}$	Возможен рост ПФ

Таблица 2 – Признаки дефектов эксплуатации КМБ (КРБ)

Дефект	Признак 1 Рост НЧ гармоник в автоспектре	Признак 2 Модуляция трения (рост)	Признак 3 Другая природа
1 Износ наружного кольца	$kf_n, k < 4$	$kf_n, k < 4$	Рост ВЧ и/или ПФ
2 Раковины, трещины наружного кольца	$kf_n, k > 3$	$kf_n, k > 3$	Рост ВЧ и/или ПФ
3 Износ внутреннего кольца	$kf_{вр}$	$kf_{вр}, k < 5, f_в$	Возможен рост ВЧ, УВЧ
4 Раковины, трещины внутреннего кольца	$kf_{вр}, k_1 f_в \pm k_2 f_{вр}$	$kf_{вр}, k_1 f_в \pm k_2 f_{вр}$	Возможен рост ВЧ, УВЧ
5 Износ тела качения и сепаратора	kf_c	$kf_c, k(f_{вр} - f_c)$	Возможен рост ВЧ, УВЧ
6 Раковины, сколы на теле качения	$2k_1 f_{тк} \pm k_2 f_c$	$2k_1 f_{тк} \pm k_2 f_c$	Рост ВЧ и/или ПФ
7 Дефект узлов крепления	$kf_{вр}$, возможно $kf_{вр} / 2$	$kf_{вр}$ возможна НпМ	Возможен рост ВЧ, УВЧ
8 Дефект смазки подшипника качения	Нет изменений	Возможно kf_n	Рост УО, ВЧ и ПФ
9 Дефект смазки моторно-осевого подшипника скольжения	Нет изменений	Возможна НпМ двух Б	Рост УО на двух подшипниках ТЭД
10 Дисбаланс ТЭД, несоосность малой шестерни	Рост $f_{вр д}$	Возможно $f_{вр д}$	Нет других изменений вибрации
11 Дефект зубьев малой шестерни	$kf_{вр д}, kf_z \pm k_1 f_{вр д}$	$kf_{вр д}, kf_z \pm k_1 f_{вр д}$	Возможен рост ПФ
12 Дисбаланс КП, несоосность большой шестерни	Рост $f_{вр к}$	Возможно $f_{вр к}$	Нет других изменений вибрации
13 Дефект зубьев большой шестерни	$k f_{вр к}, kf_z \pm k_1 f_{вр к}$	$k f_{вр к}, kf_z \pm k_1 f_{вр к}$	Возможен рост ПФ
14 Дефект зацепления	kf_z , рост СЧ	Возможно $kf_{вр д}, kf_{вр к}$	Возможен рост ПФ
15 Дефект муфты	$kf_{вр д}$	$kf_{вр д}, k > 5$	Возможен рост ПФ
16 Дефект крестовины	$4kf_{вр д}$	$4kf_{вр д}$	Возможен рост ПФ

Примечание – В таблице используются следующие обозначения: $f_{вр}$ – частота вращения контролируемого подшипника; $f_{вр д}$ – частота вращения тягового двигателя; $f_{вр к}$ – частота вращения колёсной пары; f_c – частота вращения сепаратора контролируемого подшипника; f_n – частота перекатывания тел качения по наружному кольцу; $f_в$ – частота перекатывания тел качения по внутреннему кольцу; $f_{тк}$ – частота вращения тел качения; f_z – зубцовая частота вибрации; ВЧ – высокочастотная вибрация; СЧ – среднечастотная вибрация; НпМ – непериодическая модуляция случайной вибрации; ПФ – пик-фактор; УО – уровень огибающей; УВЧ – ультразвуковая высокочастотная вибрация.

По мере накопления статистических данных по результатам ревизии отбракованных в результате диагностирования подшипников пороговые значения могут корректироваться. Рекомендации по корректиров-

ке пороговых значений может давать только разработчик диагностического программного обеспечения. Данные рекомендации должны формироваться на основании материала, представленного ведущими инже-

нерами по диагностике. Материал, на основании которого проводится корректировка пороговых значений дефектов, должен содержать в себе письменную заявку на корректировку порогов с предложениями, базы данных с измерениями и акты ревизии подшипников не менее чем для пятидесяти забракованных подшипников, редукторов и т. д.

Рекомендации по корректировке пороговых значений должны быть аргументированными и оформлены в письменном заключении за подписью руководителя организации разработчика программного обеспечения. Изменения пороговых значений могут проводить только специалисты, ответственные за результат проведения диагностирования, прошедший специальную подготовку по вибрационной диагностике оборудования локомотивов, с опытом работы не менее трех лет, на основании заключений, выданных разработчиком программного обеспечения. Допускается самостоятельная корректировка пороговых значений опытным специалистом без привлечения разработчика программного обеспечения в сторону увеличения до 15 % по следующим дефектам: бой вала, дефекты большой шестерни и малой шестерни, не идентифицированный дефект.

По результатам обнаружения диагностических признаков возможных дефектов и сравнения измеренных параметров с пороговыми значениями определяется текущее состояние подшипника и его долгосрочный прогноз. Максимальную длительность прогноза безаварийной работы подшипника обеспечивает отсутствие как развитых, так и зарождающихся дефектов, а также нахождение вибрационного состояния подшипникового узла в зоне допустимых значений.

Ответственность за допуск в эксплуатацию подшипника, в котором обнаружены зарождающиеся или развитые дефекты, несёт специалист, выполнивший диагностирование и отвечающий за результаты [1].

Заключение

Рассмотренная технология диагностики имеет высокую достоверность (свыше 90 %) при диагностировании КМБ и КРБ локомотивов [2]. Комплекс «Вектор-2000» является универсальным и может применяться практически в любых условиях, в отличие от стационарных установок ВД буксовых узлов колёсных пар, например применяемых на предприятиях вагонного хозяйства (УДП-2001, ОМСД-02 и др.).

Однако большая часть эксплуатируемого вибродиагностического оборудования в локомотивном хозяйстве устарела морально и физически. Поэтому необходимы организационные методы, которые предполагают пересмотр и обновление нормативной базы по ВД.

Результаты ВД во многом определяются квалификацией работника, который должен быть опытным специалистом и иметь достаточный стаж в работе с

таким диагностическим оборудованием совместно с такими объектами диагностики, в то время как на установках типа УДП-2001, ОМСД-02 этот субъективный фактор сводится практически к нулю и результат выводится на экран автоматически независимо от специалиста [3].

Хочется отметить, что диапазон скоростей вращения колёсной пары находится в достаточно широких пределах – от 180 до 300 об/мин. Это говорит о том, что использование минимальных значений будет вести, как правило, к пропуску дефектов, а максимальных оборотов – к перебраковке.

В настоящее время с целью повышения достоверности и глубины диагностирования ответственных узлов КМБ подвижного состава наметились тенденции опробования нетрадиционных подходов в части обработки и анализа информации, но чаще всего такие работы заканчиваются только модельными экспериментами и еще не находят широкого практического применения в области ВД [4].

Перспективными методами обработки вибросигнала можно считать использование методов [5]:

- вейвлет-преобразования, позволяющих отследить изменение спектра во времени (или получить трёхмерное спектральное поле);
- аппарата нечетких множеств;
- теории распознавания образов;
- фрактального анализа;
- искусственных нейронных сетей, позволяющих обучать диагностическое оборудование.

Список литературы

- 1 СТП БЧ 17.328-2015. Вибрационное диагностирование подшипников качения подвижного состава. Порядок организации и проведения (утверждён Приказом Зам. нач. Бел. ж.д. от 31.12.2015 №1351НЗ), 2015. – 96 с.
- 2 Технология вибрационного диагностирования подшипников качения колёсно-моторных блоков локомотивов / А. В. Барков [и др.] [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://vibro-expert.ru/tehnologiya-vibracionnogo-diagnostirovaniya-podshipnikov-kacheniya-kolesno-motornix-blokov-lokomotivov.html>. – Дата доступа : 14.09.2023.
- 3 Отока, А. Г. Опыт использования установки для вибродиагностики подшипников буксовых узлов колёсных пар вагонов УДП-2001СМ и системы диагностики механизмов ОМСД-02 / А. Г. Отока, Д. В. Будник, А. М. Лях // Надёжность. – 2022. – Т. 22, № 4. – С. 8–15.
- 4 Тэттер, А. Ю. Методы обработки сигналов при вибродиагностировании колёсно-моторных блоков локомотивов / А. Ю. Тэттер, В. Ю. Тэттер // Омский научный вестник 2017. – № 1 (151). – С. 85–90.
- 5 Тэттер В. Ю. Совершенствование системы вибродиагностики колесно-моторных блоков локомотивов / В. Ю. Тэттер // Бюллетень результатов научных исследований. – 2016. – С. 68–74.

Получено 12.12.2023

A. G. Otoka, A. S. Martyshev, L. V. Ogorodnikov, O. V. Kholodilov. Features of vibration diagnostics of rolling bearings of wheel-motor units of electric trains of the ER9 series during current repairs.

The technology of vibration diagnostics of rolling bearings of wheel-motor units of electric trains of the ER9 series during current repairs is discussed. The problems of diagnosis related to the subjective factor, which is determined by the qualifications of the employee and the length of his work, are shown. Methods of increasing the reliability of diagnostic information obtained after processing vibration signals are proposed.

ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

УДК 624.876.001.24

А. А. ПОДДУБНЫЙ, кандидат физико-математических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель; *В. А. ДАДАЛКО*, доктор экономических наук, действительный член (академик) Академии военных наук РФ, Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Российская Федерация, г. Москва; *Е. В. ПЕЧЕНЕВ*, магистр технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель.

РАСЧЕТ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ НАПЛАВНОГО БЫСТРОВЗВОДИМОГО МОСТА ГРУЗОПОДЪЕМНОСТЬЮ 500 И 1000 КГ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Производится расчет несущей способности элементов пролетных строений наплавного моста с помощью программного комплекса Autodesk Inventor. Рассматриваются и сопоставляются расчетные (смоделированные) данные с результатами натуральных испытаний. Анализируется возможность проведения предварительных испытаний 3D-моделей под заданную нагрузку, а также проектирование новых конструкций быстровозводимых мостов. Проводится мониторинг современного высокоточного оружия для возможного поражения быстровозводимых мостов и экономический анализ его эффективности.

Введение. В настоящее время быстровозводимые сборно-разборные мосты востребованы в различных условиях для реализации многих задач. Быстровозводимые мосты обладают рядом преимуществ, что позволяет применять их всевозможным видам и структурам.

Для повышения скорости развития конструкций быстровозводимых мостов, как на жестких, так и на плавучих опорах, необходимо минимизировать время на проектную и расчетную составляющие и визуализировать полученный результат.

Одной из основных задач при проектировании новых конструкций пролетных строений быстровозводимых мостов является определение несущей способности их основных элементов. При проектировании элементов конструкций быстровозводимых мостов должны выполняться требования концепции данных конструкций: возможность перемещения и строительства (монтажа) пролетных строений без применения тяжелой дорожно-строительной и грузоподъемной техники, низкая материалоемкость с высокой прочностью и долговечностью конструкции, возможность сооружения мостового перехода в труднодоступных участках местности. В зависимости от поставленных задач определяется грузоподъемность пролетных строений и опор.

На сегодня разработаны, введены в эксплуатацию и эффективно применяются несколько типов пролетных строений с плавучими опорами (рисунок 1).

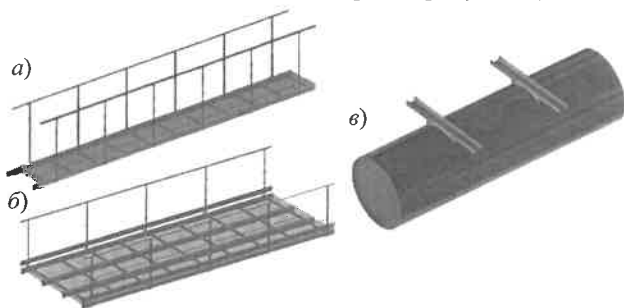


Рисунок 1 – Варианты пролетных строений и наплавной опоры быстровозводимых мостов:
а – пролетное строение СРММП-1; б – пролетное строение СРММП-2; в – наплавная опора МНПМ-1,0

Для расчета несущей способности данных конструкций необходимо определить расчетные параметры основных элементов и произвести расчеты с моделированием заданных нагрузок.

Расчет несущих элементов конструкций моста под нагрузку 500 килограмм.

Приступая к определению расчетных параметров основных элементов конструкций пролетных строений под нагрузку 500 кг, необходимо определить параметры и основные элементы, которыми будут являться: расчетная ширина пролетного строения не менее 1,8 м, длина пролетного строения 6 м, грузоподъемность до 500 кг, высота моста не менее 0,5 м от уровня высоких вод, строительная высота назначается в зависимости от сечения конструктивных элементов.

Основными элементами данного пролетного строения являются главные балки, поперечные связи, настил проезжей части.

Пролетные строения, собранные в единый мост, планируется к постройке на структурно-неустойчивых грунтах. Ввиду этого применена методика определения динамических догрузок стержня при внезапном изменении структуры упругого основания. Разработанная математическая модель процесса позволяет последовательно решить следующие задачи:

- определить статический прогиб и изгибающий момент в балке, опирающейся на упругое основание Пастернака в соответствии с граничными условиями, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой заданной интенсивности. Прогиб используется в дальнейшем как начальное условие динамического процесса (колебаний), возникающего после внезапного образования дефекта основания. Изгибающий момент используется для сравнения статических внутренних усилий в балке с динамическими в ходе колебаний;

- определить частоты и формы собственных изгибных колебаний балки, опирающейся на упругое основание Винклера;

- исследовать вынужденные изгибаемые колебания нагруженной балки на основании Винклера путем разложения нагрузки и статического прогиба, полученного еще на основании Пастернака, по формам собственных колебаний балки на основании Винклера.

Таким образом, расчет вынужденных колебаний строится методом модульного разложения исходного состояния и нагрузки по методам нового состояния.

Для анализа перемещений и напряжений в балке при взаимодействии ее с упругим основанием во всех задачах используется метод начальных параметров в сочетании с векторно-матричным представлением состояния произвольных сечений балки.

Таким образом, была рассмотрена структурная перестройка системы «балка – основание», заключающаяся во внезапном преобразовании основания Пастернака в основание Винклера, то есть во внезапной утрате основанием свойства сдвиговой жесткости, и это привело к радикальному преобразованию напряженно-деформированного состояния балки:

- изменилось положение опасного сечения (для всех значений жесткостей опасным становится середина сечения $\xi = 0,5$);

- абсолютные значения изгибающих моментов значительно увеличиваются – при этом большей жесткости системы «балка – основание» соответствует большее относительное приращение динамического изгибающего момента к статическому значению.

Расчет главных балок на прочность

Исходные данные временных и постоянных нагрузок (рисунок 2):

$P = 9,8$ кН – расчетная нагрузка;

$P_0 = P / 2 = 4,9$ кН – давление на одну ось;

$m = 2$ – количество осей квадроцикла;

$a = 1,7$ м – расстояние между осями колес.

Параметры элементов пролетного строения:

$q = 1,09$ кН/м (собственный вес балки $120 \times 80 \times 5$ мм – $0,144$ кН/м; собственный вес балки $100 \times 60 \times 4$ мм – $0,09$ кН/м; пешеходный настил: просечно-вытяжного лист настила ПВХ 406 – $0,308$ кН/м, из уголков поперечных и продольных связей сечением $40 \times 40 \times 4$ мм – $0,061$ кН/м; снеговая нагрузка – $0,25$ кН/м); $R = 210$ МПа (расчетное сопротивление стали балки при изгибе); $W_x = 30,51$ см³ (момент сопротивления балки $100 \times 60 \times 4$ мм, ГОСТ 30245–2003).

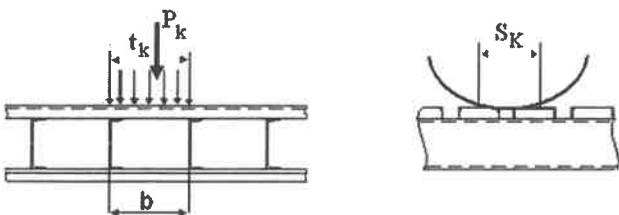


Рисунок 2 – Расчетная схема поперечного металлического настила из швеллеров

Изгибающий момент, кН·м, в одном прогоне

$$M_{np} = [M_{вр} K_n (1 + \mu) + M_n] \frac{1}{n},$$

где $M_{вр}$ – изгибающий момент от расчетной подвижной колесной нагрузки, кНм; M_n – изгибающий момент от постоянной нагрузки, кНм; K_n – коэффициент неравномерности в работе прогонов, $K_n = 1,1$; n – количество прогонов в поперечном сечении моста; $1 + \mu$ – динамический коэффициент, принимаемый для металлических прогонов равным $1,15$.

Изгибающий момент в пролетном строении от давления оси квадроцикла при центральном положении нагрузки определяется по формуле

$$M_{вр} = 0,5 P_0 (l - a) = 0,5 \cdot 4,9 (6,0 - 1,7) = 10,54 \text{ кН}.$$

Изгибающий момент, кН·м, от постоянной нагрузки определяется по формуле

$$M_n = \frac{ql^2}{8} = \frac{1,09 \cdot 6,0^2}{8} = 4,91 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

где q – равномерно распределенная вертикальная нагрузка от собственной массы пролетного строения по спецификации и снега, кН/м; l – расчетный пролет прогонов, м.

$$M_{np} = (10,84 \cdot 1,1 \cdot 1,15 + 4,91) \cdot \frac{1}{4} = 4,66 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Определение максимального нормального напряжения:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{np}}{W_{np}} = \frac{4,66 \cdot 10^3}{30,51 \cdot 10^{-6}} = 153 \text{ МПа}.$$

Проверка условия:

$$\sigma_{max} \leq mR, \text{ МПа}.$$

Для строительных конструкций используются соответствующие расчетные сопротивления ($R = 210$ МПа); m – коэффициент условий работы, $m = 0,9$.

$$153 \text{ МПа} \leq 0,9 \cdot 210 \text{ МПа};$$

$$153 \text{ МПа} \leq 190 \text{ МПа} \text{ – условие выполняется.}$$

Условия прочности выполняются. Запас прочности составляет 19% .

Расчет главных балок на изгиб

Далее будет проведен расчет пролетного строения, см, по второму предельному состоянию с использованием следующей формулы:

$$f = \frac{5}{384} \frac{P l^4}{EI_{бр}} \leq f_{пр},$$

где f – упругий прогиб в середине пролета; P – динамическая нагрузка, кН/м; E – модуль упругости стали, $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; $I_{бр}$ – момент инерции сечения одной балки относительно нейтральной оси (брутто), м⁴; n – количество балок в пролетном сечении, шт.; $f_{пр}$ – предельный вертикальный прогиб;

$$f = \frac{5}{384} \frac{1,63 \cdot 10^3 \cdot 6^4}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 1,525 \cdot 10^{-6} \cdot 4} = 2,16 \text{ см};$$

$$f_{пр} = \frac{1}{200} l = \frac{1}{200} \cdot 600 = 3,0 \text{ см}.$$

В технической документации представлены общие положения по конструктивным особенностям, изготовлению и сборке пролетного строения. Полученные значения подтверждают использование профильной трубы сечением не ниже $100 \times 60 \times 4$ мм в качестве главных балок.

Также были проведены расчеты пролетных строений как рамных конструкций с использованием компьютерной программы Autodesk Inventor.

Расчетная схема наплавного моста и нагрузки, действующие на понтон.

Наплавные мосты в целом и их отдельные конструктивные элементы рассчитывают по первому предельному состоянию на прочность, устойчивость формы и положения с учетом:

1) коэффициента надежности f – для постоянных нагрузок;

2) коэффициента надежности f и динамического $1+\mu$ – для временной подвижной вертикальной нагрузки. Остойчивость, под которой понимается способность плавсредства удерживать равновесие на воде и не опрокидываться под воздействием внешних нагрузок. В расчетах остойчивости, плавучести (осадки, крена, дифферента, излома профиля пути), а также гидродинамической устойчивости рекомендуется учитывать только нормативные нагрузки без коэффициентов перегрузки и динамики.

Нормативные постоянные нагрузки от собственного веса конструкций наплавного моста принимают по рабочим чертежами и спецификациям для элементов индивидуального проектирования. Постоянные нагрузки считают равномерно распределенными по длине моста.

Интенсивность ветровой поперечной нагрузки на конструкции моста, находящиеся над водой, принимают равной 0,35 кПа, что соответствует скорости ветра 16–18 м/с. Расчетную ветровую поверхность подсчитывают по фактической площади конструкций в проекции на вертикальную плоскость, перпендикулярную направлению ветра с коэффициентом сплошности, равным 1,0.

Наплавной мост проектируется в определенной последовательности и с учетом следующих данных:

- 1) исходные экономические и гидрометрические данные мостового перехода;
- 2) схема моста, применяемые конструкции и плавучие средства;
- 3) поперечное сечение, нагрузки и коэффициенты;
- 4) внутренне усилия и опорные реакции от различных сочетаний нагрузок;
- 5) остойчивость и плавучесть опор;
- 6) общая прочность плавучих опор и пролетных строений;
- 7) местная прочность и устойчивость конструкций, узлов, деталей, соединений;
- 8) поперечные и продольные закрепления наплавных мостов;
- 9) гидродинамическая устойчивость мостов при больших скоростях течения воды;
- 10) способы наводки-разводки мостов.

Остойчивость, плавучесть и прочность конструкций проверяют на всех стадиях эксплуатации моста при совместном действии постоянных и временных нагрузок, давления воды и ветра при их реальных невыгодных сочетаниях.

Плавучесть для разработанной конструкции можно определить, зная его геометрические и физические показатели. Под геометрическими параметрами подразумевается сечение основных элементов и пустот внутри понтона, а физическим параметрам относится удельный вес металла конструкции.

Общая грузоподъемность понтона МНПМ-1,0, т, определяется как выталкивающая сила и может быть вычислена по формуле

$$F_{\text{понт}} = \rho V_{\text{понт}} - G_{\text{понт}},$$

где ρ – плотность воды пресного водоема ($\rho = 1,0$), т/м³; $V_{\text{понт}}$ – объем водоизмещения понтона ($V_{\text{понт}} = 0,894$), м³,

$$V_{\text{понт}} = LBt_{\text{груз}}\delta,$$

L – полная длина понтона, принята 2,5 м; B – максимальная ширина понтона, принята 0,7 м; $t_{\text{груз}}$ – наибольшая грузовая осадка ($t_{\text{груз}} = 0,63$), м; δ – коэффициент полноты водоизмещения, для цилиндрической формы понтона принят равным 0,73; $G_{\text{понт}}$ – масса понтона ($G_{\text{понт}} = 0,268$), т;

Тогда

$$V_{\text{понт}} = 2,5 \cdot 0,72 \cdot 0,63 \cdot 0,73 = 0,828 \text{ м}^3;$$

$$F_{\text{понт}} = 1,0 \cdot 0,828 - 0,268 = 0,56 \text{ т.}$$

Учитывая, что на понтон опираются два пролетных строения полной длиной 8,4 м и массой 250 кг, то величину расчетной осадки, см, можно вычислить по следующей формуле:

$$t_{\text{расч}} = \frac{G_{\text{понт}} + G_{\text{пс}}}{LB\delta},$$

тогда

$$t_{\text{расч}} = \frac{268 + 250}{25 \cdot 7,2 \cdot 0,73} \cdot 10 = 39,4 \text{ см.}$$

Таким образом, расчетная осадка порожнего участка наплавного моста в составе одного понтона и двух пролетных строений составляет 39,4 см.

Расчетная грузоподъемность цилиндрического понтона под пешеходную нагрузку без учета полумассы опираемых пролетных строений составляет 310 кг при ограничивающей грузовой осадке, не превышающей 0,63 м (рисунок 3).

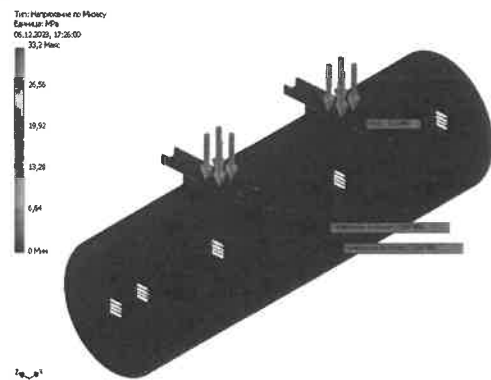


Рисунок 3 – Результаты расчета элементов под нагрузкой методом конечных элементов

Анализ современного высокоточного оружия для возможного поражения быстровозводимых мостовых переходов.

В современных вооруженных конфликтах всё чаще применяется высокоточное оружие, которое может поражать цели на большом расстоянии и с высокой точностью. Это позволяет одним боеприпасом поразить необходимую цель в том числе транспортные коммуникации (рисунок 4). Защита от такого вооружения становится всё сложнее, и необходимость применения противовоздушных средств оправдана.



Рисунок 4 – Примеры современного высокоточного вооружения:

а – Storm Shadow; б – сменный пакет 227 мм ракет MFOM и тактическая ракета MGM-140 ATACMS PC30 M142 HIMARS

Однако экономический анализ позволяет выявить, что сопоставление стоимости высокоточных боеприпасов и объектов быстровозводимых мостов показывают большую разницу.

В таблице 1 представлена стоимость современных средств поражения (стоимость взята из открытых источников).

Таблица 1 – Стоимость современных ВТО

Наименование ВТО	Стоимость, млн дол.
ATACMS Block I	2,3
ATACMS Block IA	
ATACMS Block IA Unitary	
Storm Shadow	3,2
X-47 «Кинжал»	5
ОКР «Калибр»	0,35-0,5
BGM-109 Tomahawk	1,87
AGM-158 JASSM	1,5
AGM-158C LRASM	1

Данные таблицы 1 показывают, что стоимость высокоточного вооружения высока. С учетом того в расчет не была взята стоимость средств доставки, обслуживания, систем наведения и так далее, можно утвер-

Получено 14.02.2024

A. A. Poddubny, V. A. Dadalco, E. V. Pechanov. Calculation of the load capacity of elements of a loaded quickly recoverable bridge with a load capacity of 500 and 1000 kg using a software complex.

The load-bearing capacity of the floating bridge span elements is calculated using the Autodesk Inventor software package. The calculated (modeled) data are reviewed and compared with the results of full-scale tests. The possibility of conducting preliminary tests of 3D models for a given load, as well as the design of new designs of prefabricated bridges, is analyzed. Monitoring of modern high-precision weapons for the possible destruction of prefabricated bridges and an economic analysis of their effectiveness are carried out.

ждать, что поражение данными средствами быстровозводимых сборно-разборных мостов экономически невыгодно.

В таблице 2 представлена стоимость пролетных строений основных быстровозводимых мостов.

Таблица 2 – Стоимость элементов быстровозводимых мостов

Элемент быстровозводимого моста	Стоимость, бел. руб. (дол.)
1 м. п. СРММП-1 с опорами	469,41 (144,43)
1 м. п. СРММП-2 с опорами	613,34 (188,72)
1 наплавная опора МНПМ-1,0	2056,73 (632,84)

Вывод. Проанализировав стоимость современного высокоточного вооружения и быстровозводимых сборно-разборных мостов, можно сделать заключение, что уничтожение мостов с помощью данного вооружения экономически нецелесообразно. При разрушении секции или даже моста полностью темпы его восстановления и стоимость элементов моста (его ремонта) несопоставимы с затратами на их уничтожение.

Список литературы

1 Поддубный, А. А. Особенности применения сборно-разборных быстровозводимых мостов / А. А. Поддубный, И. С. Демидович // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2023. – № 1 (46). – С. 39–41.

2 Poddubny, A. A. Dynamic Loading of the Rod at a Sudden of Elastic Foundation Structure / A. A. Poddubny, V. A. Gordon // IOP Conference Series: Material Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1079. – P. 1–18.

3 Added stress of a cantilever under sudden alterations in its foundation / A. A. Poddubny [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2497, is. 1. – P. 1–10.

4 Поддубный, А. А. Концепция интеллектуальной системы поддержки принятия решений по восстановлению мостовых переходов / А. А. Поддубный, Е. В. Печенев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2023. – № 1 (46). – С. 42–44.

5 Мосты и переправы на военно-автомобильных дорогах. В 3 ч. Ч. 2, М84 Низководные мосты из местных материалов : учеб. пособие / С. М. Бобрицкий [и др.]. – Гомель : БелГУТ. – 271 с.

УДК 624.8

А. А. ПОДДУБНЫЙ, кандидат физико-математических наук, И. С. ДЕМИДОВИЧ, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ПРИМЕНЕНИЕ ГИБКИХ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ЗАКРЕПЛЕНИЯ НАПЛАВНЫХ БЫСТРОВОВОЗВОДИМЫХ МОСТОВ НА УЧАСТКЕ ИХ ВОЗВЕДЕНИЯ

Рассматриваются варианты применения гибких стержневых элементов для плавучих опор быстровозводимых мостовых конструкций в линию моста.

Введение. С учетом современных условий возможного возникновения чрезвычайных ситуаций для организации сообщения через водные преграды требуется использование быстровозводимых мостов. В ходе выполнения научно-исследовательских работ по шифрам «Строение», «Строение-2» были спроектированы сборно-разборные металлические мостовые пролеты СРММП-1 в трех вариантах и СРММП-2. С их использованием были спроектированы и возведены мостовые переходы под различную нагрузку. Данные конструкции предназначены для быстрой установки низководных мостов в труднодоступных местах, при чрезвычайных ситуациях и при ликвидации последствий стихийных бедствий. При разработке основной задачей являлось снижение трудоемкости монтажа мостового пролета, упрощение конструкции для уменьшения массы и количества деталей, снижение стоимости при изготовлении, сборке и эксплуатации. В Республике Беларусь уже возведены и эксплуатируются объекты с применением данных конструкций.

Варианты плавучих опор для быстровозводимых мостов.

В зависимости от местных условий для возведения мостов с применением сборно-разборных пролетных строений могут быть использованы различные типы опор.

Жесткие опоры изготавливаются в виде металлических рамных конструкций и могут быть применены в условиях структурно неустойчивых грунтов или на водных преградах ограниченной глубины [1].

При необходимости перекрытия крупных водных преград или в условиях, сложных для доставки и установки жестких опор для строительства моста с применением разработанных пролетных строений могут быть применены наплавные опоры различных конструкций, например, круглого или трапециевидного сечения (рисунки 1, 2).

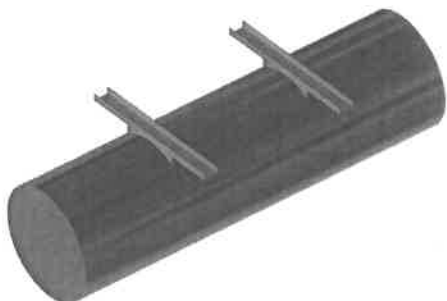


Рисунок 1 – Общий вид наплавной опоры круглого сечения

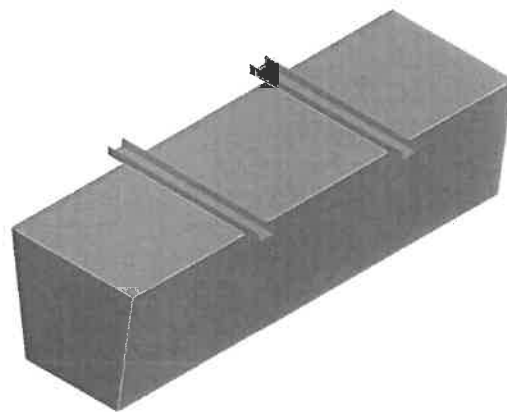


Рисунок 2 – Общий вид наплавной опоры трапециевидного сечения

Конструкция наплавного моста и сроки его наводки практически не зависят от глубины воды или характера грунта дна водной преграды, тогда как эти факторы почти целиком определяют способы, сроки и сложность возведения моста на жестких опорах.

Кроме того, наплавной вариант моста обладает и другими преимуществами, такими как высокая мобильность. К примеру, после завершения эксплуатации возведенного мостового перехода на плавучих опорах он в кратчайшие сроки может быть разобран и перевезен в зависимости от необходимости либо на хранение, либо на новое место возведения. Более того, при сложности доставки материалов к месту возведения мостового перехода, мост практически полностью может быть собран в более подходящем месте на этом же водном объекте, а затем транспортирован к месту строительства по воде. Аналогичным способом после окончания эксплуатации мост практически без разборки может быть перевезен к другому месту на этом же водотоке, где в нем есть необходимость.

Особенности применения наплавного варианта моста.

Особенностью применения плавучих опор является отсутствие жесткой связи с грунтом и, как следствие, их относительная горизонтальная и вертикальная подвижность. Вертикальные перемещения возникают вследствие изменения уровня воды, а также осадки опоры под нагрузкой.

Горизонтальные перемещения возникают от внешних факторов, таких, как течение воды, ветровая нагрузка, динамическая нагрузка при движении по мосту людей или транспортных средств. При относи-

тельно небольших длинах моста конструкция способна противостоять таким воздействиям, однако при значительной длине моста необходимо введение в конструкцию дополнительных элементов, придающих поперечную жесткость наплавному мосту.

Анализ существующих схем закрепления наплавных мостов.

Продольные и поперечные крепления к берегам и дну водной преграды предназначены для удержания моста в горизонтальной плоскости. Поперечные крепления устанавливаются с верхней и нижней стороны. Они служат для удержания наплавного моста от сноса его течением и ветром. Продольные крепления удерживают мост от смещений, вызванных динамическими усилиями, возникающими в линии моста.

Классическим и отработанным вариантом закрепления наплавных мостов является использование якорей, фиксирующих плавучие опоры от горизонтальных поперечных перемещений (рисунок 3). Однако этот способ достаточно трудо- и материалоемкий, так как для его реализации, помимо самих якорей и тросов (цепей), требуется наличие на каждой плавучей опоре якорных лебедок (шпилей), а также устройство клюзов и цепных ящиков.

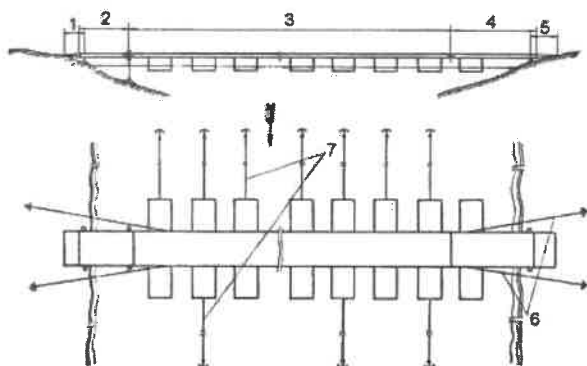


Рисунок 3 – Схема якорного закрепления наплавного моста на отдельных опорах:

1, 5 – береговая часть; 2, 4 – переходная часть; 3 – речная часть; 6 – продольные закрепления; 7 – поперечные закрепления

Другим вариантом закрепления плавучих опор в линию моста является использование натянутых между берегов водной преграды канатов (гибких стержневых элементов).

Предложения по закреплению наплавных быстровозводимых мостов на участке их возведения.

Закрепление наплавного моста за натянутые между берегов продольные канаты (тросы) во многом проще, так как не требует установки многочисленных якорей с последующим выравниванием отдельных понтонов по оси, а значит, предпочтительнее в случае необходимости быстрого строительства мостового перехода. Такой способ подразумевает заблаговременную натяжку канатов до спуска на воду плавучих опор. Закрепляются канаты либо за естественные объекты на берегу (крепкие деревья, старые бетонные конструкции и т. п.), либо за искусственные анкеры (например, забивные или винтовые сваи, вкопанные бетонные блоки). При этом при значительных длинах моста канаты натягиваются не по прямой, а по дуге с изгибом в сторону

моста, что позволит снизить в них продольную растягивающую силу (рисунок 4). Крепление плавучих опор за канат можно организовать с помощью гибких строп с карабинами, что существенно ускорит процесс монтажа.

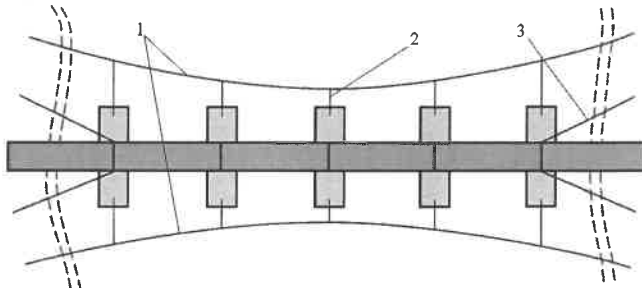


Рисунок 4 – Схема закрепления наплавного быстровозводимого моста:

1 – канаты, удерживающие мост от поперечного перемещения; 2 – соединительные стропы; 3 – канаты, удерживающие мост от продольных перемещений

Гибкие стропы прикрепляются к проушинам на понтонах плавучих опор с помощью петли и винтовых канатных зажимов (рисунок 5). Такое решение позволит оперативно регулировать длину стропы, выставляя таким образом плавучую опору в проектное положение в оси моста.



Рисунок 5 – Петля с винтовым зажимом для регулирования длины стропы

Во время монтажа моста на установленные плавучие опоры укладываются пролетные строения СРММП-1 или СРММП-2. При этом изготовление малогабаритного сборно-разборного мостового пролета можно организовать как на предприятиях, так и в полевых условиях. Все его элементы рассчитаны таким образом, что не составляет трудностей их перевозить любым видом транспорта, производить погрузочно-разгрузочные работы без использования специальной техники [2].

Для изготовления данных пролетов в полевых условиях необходима доставка к месту работ оборудования и инструмента, а также материалов. При этом подготовительные работы должны быть сведены к минимуму.

К выбору площадки для производства работ нет особых требований, она должна лишь позволять разместить пролетное строение длиной 6 м (8,4, 9,2 м, в

зависимости от варианта пролетного строения), необходимое оборудование и материалы.

Последовательность работ включает:

- доставку материалов и оборудования к месту производства работ;
- подготовку материалов (обрезку в проектный размер всех элементов, при необходимости – очистку);
- установку главных балок пролетного строения из профильной трубы с соблюдением необходимого пространственного положения (параллельность, ширина между осями, перпендикулярность их торцов);
- установку и приваривание к главным балкам поперечных связей пешеходного настила;
- установку и приваривание продольных связей пешеходного настила;
- установку и приваривание прорезно-вытяжного листа пешеходного настила;
- приваривание креплений для перильного ограждения к главным балкам пролетного строения;
- сборку перильного ограждения;
- установку и закрепление перильного ограждения на пролетное строение;
- покрасочные работы.

При труднодоступности места производства работ для проезда техники плавучие опоры могут доставляться к месту строительства по воде, кроме того, они могут быть использованы в качестве паромов для доставки материалов пролетных строений.

Вывод. Быстровозводимые мосты и переправы имеют широкие перспективы применения. Простота

конструкции обеспечивает возможность изготовления пролетных строений при минимальном обучении технического персонала, практически в любых условиях обстановки. Применение наплавного варианта моста существенно расширяет возможности его использования, так как плавучие опоры могут эксплуатироваться на любых глубинах и характерах грунта дна водной преграды. Для решения задачи поперечного закрепления моста можно использовать любые известные способы, но наиболее целесообразно применять схему закрепления с продольно натянутыми канатами, так как снижаются материалоемкость и трудозатраты.

Список литературы

1 **Поддубный, А. А.** Особенности применения сборно-разборных быстровозводимых мостов / А. А. Поддубный, И. С. Демидович // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2023. – № 1 (46). – С. 39–41.

2 **Поддубный, А. А.** Предложения по организации работ в полевых условиях при изготовлении элементов конструкций быстровозводимых мостов / А. А. Поддубный, И. С. Демидович // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2023. – № 2 (47). – С. 28–31.

3 **Poddubny, A. A.** Dynamic Loading of the Rod at a Sudden of Elastic Foundation Structure / A. A. Poddubny, V. A. Gordon // IOP Conference Series: Material Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1079. – Paper 042076.

4 **Поддубный, А. А.** Концепция интеллектуальной системы поддержки принятия решений по восстановлению мостовых переходов / А. А. Поддубный, Е. В. Печенев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2023. – № 1 (46). – С. 42–44.

Получено 14.02.2024

A. A. Poddubny, I. S. Demidovich. Application of flexible rod elements for fastening floated rapid bridges at their construction site.

Options for using flexible rod elements for floating supports of prefabricated bridge structures in the bridge line are being considered.

УДК 691.32:624.012.45/46

А. А. ВАСИЛЬЕВ, кандидат технических наук, Ю. К. КАБЫШЕВА, аспирант, М. И. ТКАЧЕВА, аспирант, К. Э. АГЕЕВА, магистрант, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

АНАЛИЗ ПРЕДЕЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЫ КАРБОНИЗАЦИИ ДЛЯ ПОДВИЖНЫХ СМЕСЕЙ БЕТОНОВ КЛАССОВ ПО ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ $C^{12/15}-C^{50/60}$

Показана необходимость исследования граничных значений карбонизации бетона. Предложена характеристика предельной величины карбонизации бетона (показателя ПВК). Предложена методика упрощенного расчета показателя ПВК и зависимости ПВК = $f(\zeta, R)$, полученные на его основе. Выполнены расчеты показателя ПВК и приведены математические зависимости показателя ПВК от количества использованного цемента и отпускной прочности бетона для бетонов различных классов по прочности на сжатие, бездобавочных смесей марок по удобоукладываемости П1–П5. Выполнен анализ применения различных зависимостей расчета показателя ПВК.

Введение. Карбонизация бетона – основной вид коррозии бетона железобетонных элементов (ЖБЭ) и конструкций (ЖБК), эксплуатирующихся в различных воздушных средах [1–3]. Именно она, в первую очередь, определяет остаточный ресурс, долговечность, материальные затраты на восстановление подавляющего большинства ЖБЭ и ЖБК, эксплуатирующихся в мире [3].

Результаты многолетних исследований [4–10] показали, что существующие методы оценки и прогнозирования карбонизации бетона, основанные на ФФТ (фенолфталеиновом тесте) не позволяют ни оценивать, ни прогнозировать толщину карбонизированного бетона, т. е. совершенно неработоспособны на практике, а разработанный на основе определения карбонатной составляющей (показателя КС), характеризующей количественное содержание карбонатов в цементно-песчаной фракции бетона в массовых процентах в исследуемой пробе, комплексный метод оценки и прогнозирования технического состояния ЖБЭ (ЖБК) с учетом карбонизации бетона [1–3], позволяет оценивать и прогнозировать не только карбонизацию бетона в любом сечении конструкции, но и коррозионное состояние стальной арматуры, техническое состояние, остаточный ресурс и долговечность ЖБЭ (ЖБК) в целом.

Карбонизация бетона продолжается всё время эксплуатации бетона и железобетона, однако для различных составов бетона максимальные значения карбонатной составляющей как сразу после изготовления, так и в процессе эксплуатации будут отличаться, причем отличия будут возрастать с увеличением срока эксплуатации и агрессивности эксплуатационной среды.

Граничные значения параметров карбонизации зависят от различных факторов, в первую очередь от количества использованного цемента и степени гидратации цемента (α), во вторую – от степени агрессивности эксплуатационных условий [3].

Для определения карбонизируемости бетонов различных составов необходимо ввести в практику новые понятия, в том числе понятие предельной величины карбонизации – показателя ПВК, позволяющего определять и сравнивать предельные величины карбонизации в зависимости от состава бетона (содержания цемента). Он является базовым для создания производных показателей карбонизации, позволяющих количественно и качественно оценивать и прогнозировать карбонизацию бетона.

Основная часть. Максимальную карбонизируемость бетона предложено оценивать предельной величиной карбонизации [3]. ПВК характеризует содержание карбонатов в бетоне в массовых процентах при условии, что весь СаО цемента полностью перейдет в СаСО₃ ($\alpha = 1$). Значения ПВК зависят от состава бетона и определяются по известной массе каждого компонента бетонной смеси.

Показатель ПВК определялся для цементно-песчаной фракции бетонной смеси по методике, представленной в [4]. Для расчета предельных величин карбонизации исследовали бездобавочные бетоны составов марок по удобоукладываемости П1–П5 (ОК = 1...25 см) для классов бетона по прочности на сжатие $C^{12/15}-C^{50/60}$.

Для расчета составов бетона использовали вычислительный комплекс «Технолог», реализующий многофакторный метод, проф. В. В. Бабицкого. При расчете компонентов бетонной смеси принимали портландцемент ПЦ 500 Д0 (ОАО «Белорусский цементный завод»), для которого процентное содержание СаО в цементе – 0,66; активность цемента – 50,0 МПа; нормальная густота НГ = 26,5 %.

Значения ПВК рассчитывали для отпускных прочностей бетона $R = 70, 80, 90$ и 100 %. Для каждого класса бетона по прочности на сжатие, и каждого значения отпускной прочности рассчитывали значения ПВК по 25 составам бездобавочного бетона. Было выполнено исследование 1300 составов бетонов. По полученным значениям ПВК строили зависимости $PVK = f(\zeta, R_{tp})$. При построении зависимостей $PVK = f(\zeta, R_{tp})$ использовали только крайние (граничные значения ζ , кг/м³, и ПВК, %), что достаточно, поскольку ранее в работе [4] были получены зависимости $PVK = f(\zeta, R_{tp})$ для различных классов бетона по прочности на сжатие, для каждого значения ζ и ПВК (ОК = 1...25 см), с коэффициентами детерминации $R^2 = 0,9999...0,9959$.

В общем виде выражение зависимости ПВК от количества использованного цемента (состава бетона) [11]

$$PVK = k_1 \zeta + k_2, \quad (1)$$

где k_1 – коэффициент, определяющий минимальное значение ПВК, $\frac{\% \cdot \text{м}^3}{\text{кг}}$; ζ – содержание цемента, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; k_2 – коэффициент прироста значений ПВК, %.

Полученные зависимости $PVK = f(\zeta, R_{tp})$ для различных классов бетона по прочности на сжатие (составов) и граничных значений отпускных прочностей бетона 70, 80, 90 и 100 % представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимости ПВК = $f(\Pi, R_{рп})$ для бетонов различных классов по прочности на сжатие (смеси П1–П5) для различных граничных значений отпускных прочностей бетона

Класс бетона по прочности на сжатие	Предел значений Π , кг/м ³	Зависимость ПВК = $f(\Pi, R_{рп})$	Предел значений ПВК, %	Предел значений Π , кг/м ³	Зависимость ПВК = $f(\Pi, R_{рп})$	Предел значений ПВК, %
70			80			
C ¹² / ₁₅	195–265	0,0763 Π + 4,730	19,60–24,94	211–286	0,0745 Π + 5,340	21,06–26,64
C ¹⁶ / ₂₀	252–343	0,0695 Π + 7,080	24,60–30,92	273–374	0,0680 Π + 7,720	26,28–33,14
C ¹⁸ / _{22,5}	279–385	0,0673 Π + 7,890	26,77–33,90	302–422	0,0657 Π + 8,667	28,77–36,38
C ²⁰ / ₂₅	306–428	0,0653 Π + 8,802	28,79–36,76	311–470	0,0629 Π + 9,764	30,59–39,34
C ²² / _{27,5}	331–471	0,0628 Π + 9,8395	30,61–39,40	360–518	0,0599 Π + 11,02	32,60–42,07
C ²⁵ / ₃₀	357–513	0,0589 Π + 11,20	32,40–41,81	394–565	0,0524 Π + 12,75	34,80–44,52
C ²⁸ / ₃₅	418–599	0,0547 Π + 14,44	36,29–46,19	461–661	0,0494 Π + 15,99	38,29–48,66
C ³⁰ / ₃₇	441–632	0,0519 Π + 14,76	37,64–47,55	487–698	0,0466 Π + 17,46	40,18–50,02
C ³² / ₄₀	476–682	0,0480 Π + 16,75	39,58–49,46	527–754	0,0428 Π + 19,62	42,19–51,90
C ³⁵ / ₄₅	533–763	0,0420 Π + 19,95	42,49–52,22	591–845	0,0375 Π + 22,95	45,11–54,63
C ⁴⁰ / ₅₀	589–842	0,0376 Π + 22,90	45,02–54,53	654–935	0,0329 Π + 26,12	47,66–56,92
C ⁴⁵ / ₅₅	644–919	0,0337 Π + 25,56	47,27–56,55	716–1022	0,0293 Π + 28,94	49,88–58,83
C ⁵⁰ / ₆₀	697–995	0,0303 Π + 28,13	49,25–58,28	777–1092	0,0271 Π + 30,82	51,84–60,36
90			100			
C ¹² / ₁₅	242–308	0,0727 Π + 5,970	22,40–28,36	242–330	0,0707 Π + 6,658	23,77–30,00
C ¹⁶ / ₂₀	293–407	0,0664 Π + 8,374	27,83–35,40	314–442	0,0645 Π + 9,140	29,40–37,65
C ¹⁸ / _{22,5}	325–460	0,0636 Π + 9,504	30,18–38,76	348–500	0,0612 Π + 10,47	31,78–41,09
C ²⁰ / ₂₅	357–513	0,0605 Π + 10,77	32,37–41,81	389–558	0,0572 Π + 12,24	34,50–44,16
C ²² / _{27,5}	395–566	0,0568 Π + 12,44	34,87–44,58	430–616	0,0532 Π + 14,12	37,01–46,90
C ²⁵ / ₃₀	432–619	0,0524 Π + 14,63	37,11–47,01	471–675	0,0479 Π + 16,95	39,32–49,19
C ²⁸ / ₃₅	507–726	0,0446 Π + 18,59	41,21–50,98	554–793	0,0405 Π + 21,05	43,46–53,13
C ³⁰ / ₃₇	535–766	0,0421 Π + 20,08	42,58–52,30	586–836	0,0379 Π + 22,66	44,88–54,44
C ³² / ₄₀	580–829	0,0384 Π + 22,37	44,63–54,18	635–908	0,0342 Π + 25,24	46,93–56,26
C ³⁵ / ₄₅	652–931	0,0331 Π + 26,02	47,58–56,81	716–1022	0,0293 Π + 28,94	49,88–58,83
C ⁴⁰ / ₅₀	723–1031	0,029 Π + 29,17	50,11–59,03	795–1133	0,0254 Π + 32,23	52,39–60,96
C ⁴⁵ / ₅₅	792–1129	0,0254 Π + 32,17	52,31–60,87	872–1242	0,0221 Π + 35,23	54,52–62,71
C ⁵⁰ / ₆₀	860–1226	0,0225 Π + 34,85	54,23–62,48	949–1350	0,0195 Π + 37,86	56,39–64,22

Путем интерполяции значений коэффициентов k_1 и k_2 для граничных значений отпускной прочности бетона на сжатие (70, 80, 90 и 100 %) получены линейные зависимости коэффициентов k_1 и k_2 для различных отпускных прочностей бетона.

В общем виде зависимость коэффициентов k_1 и k_2 от отпускной прочности бетона

$$k_1 = k_3 R + k_4, \quad (2)$$

$$k_2 = k_5 R + k_6, \quad (3)$$

где k_3 – k_6 – коэффициенты, аппроксимирующие линейную зависимость; k_3 , $\frac{M^3}{кг}$; k_4 , $\frac{\% \cdot M^3}{кг}$; k_5 , д. ед.; k_6 , %; R – отпускная прочность бетона, МПа.

С учетом зависимостей $k_1 = f(R)$ и $k_2 = f(R)$ получены выражения ПВК = $f(\Pi, R)$ для различных классов бетона по прочности на сжатие (таблица 2).

Таблица 2 – Зависимости ПВК = $f(\Pi, R)$ для бетонов различных классов по прочности на сжатие (подвижность смеси П1–П5) и отпускной прочности 70–100 %

Класс бетона по прочности на сжатие	Зависимость ПВК = $f(\Pi, R)$
C ¹² / ₁₅	$(-0,0002R + 0,0894)\Pi + 0,0641R + 0,2220$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\Pi = 195 \dots 330$ кг/м ³)
C ¹⁶ / ₂₀	$(-0,0002R + 0,0812)\Pi + 0,0683R + 2,697$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\Pi = 252 \dots 442$ кг/м ³)
C ¹⁸ / _{22,5}	$(-0,0002R + 0,0818)\Pi + 0,0830R + 2,102$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\Pi = 279 \dots 500$ кг/м ³)

Окончание таблицы 2

Класс бетона по прочности на сжатие	Зависимость ПВК = $f(\Pi, R)$
C ²⁰ / ₂₅	$(-0,0003R + 0,0842)\Pi + 0,1131R + 0,7767$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\Pi = 306 \dots 558$ кг/м ³)
C ²² / _{27,5}	$(-0,0003R + 0,0853)\Pi + 0,1427R - 0,2760$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\Pi = 331 \dots 616$ кг/м ³)
C ²⁵ / ₃₀	$(-0,0004R + 0,0878)\Pi + 0,1911R - 0,9919$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\Pi = 357 \dots 675$ кг/м ³)
C ²⁸ / ₃₅	$(-0,0005R + 0,0876)\Pi + 0,2544R - 4,356$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\Pi = 418 \dots 793$ кг/м ³)
C ³⁰ / ₃₇	$(-0,0005R + 0,0842)\Pi + 0,2632R - 3,626$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\Pi = 441 \dots 836$ кг/м ³)
C ³² / ₄₀	$(-0,0005R + 0,0798)\Pi + 0,2820R - 2,977$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\Pi = 476 \dots 908$ кг/м ³)
C ³⁵ / ₄₅	$(-0,0004R + 0,0724)\Pi + 0,3001R - 1,047$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\Pi = 533 \dots 1022$ кг/м ³)
C ⁴⁰ / ₅₀	$(-0,0004R + 0,0657)\Pi + 0,3013R + 1,231$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\Pi = 589 \dots 1133$ кг/м ³)
C ⁴⁵ / ₅₅	$(-0,0004R + 0,0605)\Pi + 0,3226R + 3,054$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\Pi = 644 \dots 1242$ кг/м ³)
C ⁵⁰ / ₆₀	$(-0,0004R + 0,0563)\Pi + 0,3322R + 4,677$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\Pi = 697 \dots 1350$ кг/м ³)

Ранее, в [12], на основании исследования составов бездобавочных бетонов классов по прочности на сжа-

тие $C^8/10-C^{40}/50$ были получены полиномиальные зависимости 3-й степени предельной величины карбонизации бездобавочного бетона от количества использованного цемента для различных отпускных прочностей бетона марок бетонной смеси по удобоукладываемости П1–П5 (ОК = 1...25 см).

$$\begin{aligned} \text{ПВК} = & (-0,0028R^2 + 0,4325R - 13,78)10^{-8}\text{Ц}^3 - \\ & - 9,0 \cdot 10^{-5}\text{Ц}^2 + (-5,0 \cdot 10^{-6}R^2 + 0,0007R + 0,0970)\text{Ц} + \\ & + 6,0 \cdot 10^{-4}R^2 - 0,1012R + 2,381. \end{aligned} \quad (4)$$

Представляет интерес сравнение полученных выражений по анализу граничных значений ПВК, определенных по выражениям (1) и (4) для оценки возможности применения зависимостей (1) как менее сложных при достаточной точности.

Для анализа получаемых значений ПВК строили зависимости $\text{ПВК} = f(\text{Ц}, R)$ для всех вышеперечисленных бетонов классов по прочности на сжатие по зависимостям (1) и (4).

В качестве примера, на рисунках 1–3 представлены зависимости Ц-ПВК при $R = 75\%$, полученные по выражениям (1) с учетом зависимостей (2), (3) и (4) для бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12}/15$, $C^{28}/35$ и $C^{50}/60$ соответственно.

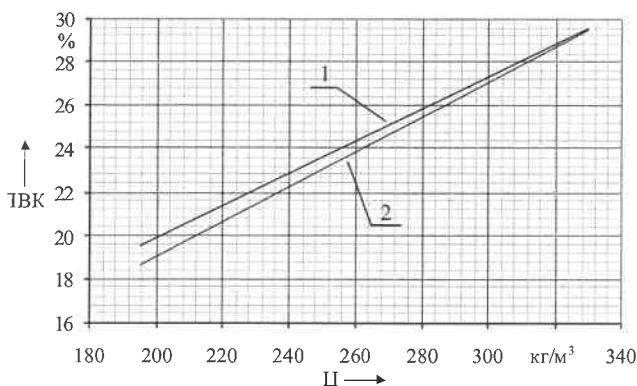


Рисунок 1 – Зависимость Ц-ПВК для бетона класса по прочности на сжатие $C^{12}/15$ и отпускной прочности бетона 75 %
1 – по зависимости (1); 2 – по зависимости (2)

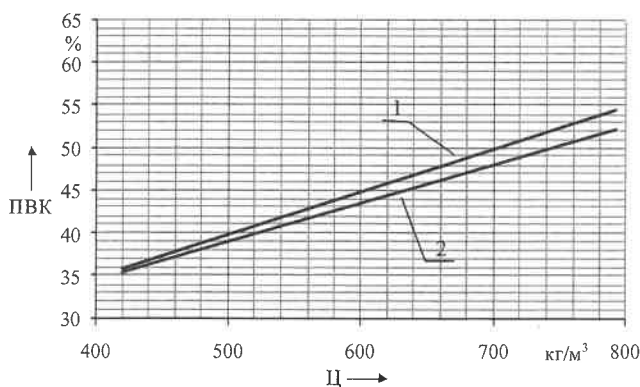


Рисунок 2 – Зависимость Ц-ПВК для бетона класса по прочности на сжатие $C^{28}/35$ и отпускной прочности бетона 75 %:
1 – по зависимости (1); 2 – по зависимости (2)

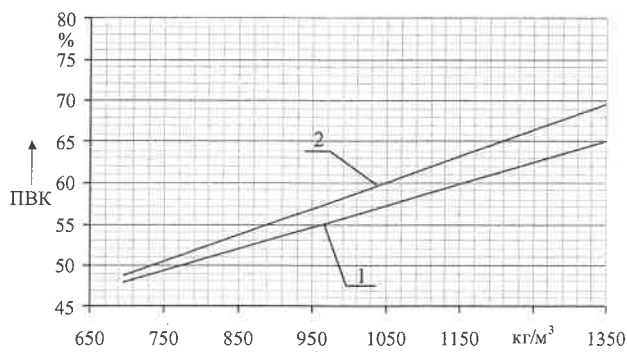


Рисунок 3 – Зависимость Ц-ПВК для бетона класса по прочности на сжатие $C^{50}/60$ и отпускной прочности бетона 75 %
1 – по зависимости (1); 2 – по зависимости (2)

Анализ полученных результатов показывает, что для бетона класса по прочности на сжатие $C^{12}/15$ разница в значениях ПВК составляет до 4,7 %, при этом максимальная разница в абсолютных значениях ПВК – до 0,9 %. Для бетона класса по прочности на сжатие $C^{28}/35$, разница значений ПВК составила, соответственно до 4,1 и 2,2 %. Для бетона класса по прочности на сжатие $C^{50}/60$ – соответственно до 6,5 и 4,4 %.

Разница значений ПВК при перерасчете значений ПВК в СФК (степень фактической карбонизации) [3] дает такое же (либо меньшее) различие, что практически соизмеримо с точностью отбора проб бетона (4 %) [2] и является несущественным.

Необходимо отметить, что при производстве наиболее часто применяемых железобетонных изделий массово используются бетонные смеси марки по удобоукладываемости П1.

Зависимости $\text{ПВК} = f(\text{Ц}, R)$ для бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12}/15-C^{50}/60$ смесей марки по удобоукладываемости П1 (ОК = 1...4 см) приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Зависимости ПВК = $f(\text{Ц}_{\text{п1}}, R)$ для бетонов различных классов по прочности на сжатие (подвижность смеси П1) и отпускной прочности 70–100 %

Класс бетона по прочности на сжатие	Зависимость $\text{ПВК} = f(\text{Ц}_{\text{п1}}, R)$
$C^{12}/15$	$(-0,0003R + 0,1108)\text{Ц} + 0,0661R - 2,808$ ($R = 70 \dots 100\%$; $\text{Ц} = 195 \dots 265 \text{ кг/м}^3$)
$C^{16}/20$	$(-0,0003R + 0,0987)\text{Ц} + 0,0841R - 1,630$ ($R = 70 \dots 100\%$; $\text{Ц} = 252 \dots 343 \text{ кг/м}^3$)
$C^{18}/22,5$	$(-0,0003R + 0,0957)\text{Ц} + 0,0841R - 0,611$ ($R = 70 \dots 100\%$; $\text{Ц} = 279 \dots 387 \text{ кг/м}^3$)
$C^{20}/25$	$(-0,0003R + 0,0951)\text{Ц} + 0,1025R - 1,060$ ($R = 70 \dots 100\%$; $\text{Ц} = 306 \dots 432 \text{ кг/м}^3$)
$C^{22}/27,5$	$(-0,0004R + 0,0953)\text{Ц} + 0,1319R - 2,035$ ($R = 70 \dots 100\%$; $\text{Ц} = 331 \dots 478 \text{ кг/м}^3$)
$C^{25}/30$	$(-0,0004R + 0,0970)\text{Ц} + 0,1679R - 3,683$ ($R = 70 \dots 100\%$; $\text{Ц} = 357 \dots 523 \text{ кг/м}^3$)
$C^{28}/35$	$(-0,0004R + 0,0913)\text{Ц} + 0,2188R - 3,375$ ($R = 70 \dots 100\%$; $\text{Ц} = 418 \dots 615 \text{ кг/м}^3$)
$C^{30}/37$	$(-0,0004R + 0,0897)\text{Ц} + 0,2188R - 3,530$ ($R = 70 \dots 100\%$; $\text{Ц} = 441 \dots 651 \text{ кг/м}^3$)

Класс бетона по прочности на сжатие	Зависимость ПБК = $f(\rho_{пл}, R)$
C ³² / ₄₀	$(-0,0005R + 0,0886)\rho + 0,2547R - 4,655$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 476 \dots 705$ кг/м ³)
C ³⁵ / ₄₅	$(-0,0005R + 0,0835)\rho + 0,2900R - 4,361$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 533 \dots 794$ кг/м ³)
C ⁴⁰ / ₅₀	$(-0,0005R + 0,0766)\rho + 0,3038R - 2,518$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 589 \dots 802$ кг/м ³)
C ⁴⁵ / ₅₅	$(-0,0005R + 0,0717)\rho + 0,3275R - 1,656$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 644 \dots 878$ кг/м ³)
C ⁵⁰ / ₆₀	$(-0,0004R + 0,0644)\rho + 0,3215R + 1,574$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 697 \dots 1052$ кг/м ³)

Кроме того, при укрупненном прогнозировании значений ПБК, учитывая, что для марки бетонной смеси П1 массово применяются составы с ОК = 3 (4) см, целесообразно принимать не среднее значение количества использованного цемента, а соответствующее верхней границе (ОК = 4 см). Таким образом, при укрупненном прогнозировании можно использовать абсолютные значения ПБК (полученные с учетом зависимостей (1)–(3), приведенные в таблице 4.

Таблица 4 – Зависимости ПБК = $f(\rho_{гр}, R)$ для бетонов различных классов по прочности на сжатие (подвижность смеси П1, ОК = 4 см) для отпускной прочности 70–100 %

Класс бетона по прочности на сжатие	Зависимость ПБК = $f(\rho_{гр}, R)$
C ¹² / ₁₅	$-0,0134R + 26,55$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 265$ кг/м ³)
C ¹⁶ / ₂₀	$-0,022R + 32,22$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 343$ кг/м ³)
C ¹⁸ / _{22,5}	$-0,032R + 36,43$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 387$ кг/м ³)
C ²⁰ / ₂₅	$-0,0271R + 40,02$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 432$ кг/м ³)
C ²² / _{27,5}	$-0,0593R + 43,52$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 478$ кг/м ³)
C ²⁵ / ₃₀	$-0,0413R + 47,05$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 523$ кг/м ³)
C ²⁸ / ₃₅	$-0,0444R + 52,77$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 615$ кг/м ³)
C ³⁰ / ₃₇	$-0,0416R + 54,87$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 651$ кг/м ³)
C ³² / ₄₀	$-0,0978R + 57,81$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 705$ кг/м ³)
C ³⁵ / ₄₅	$-0,1070R + 61,94$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 794$ кг/м ³)
C ⁴⁰ / ₅₀	$-0,1372R + 65,04$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 802$ кг/м ³)
C ⁴⁵ / ₅₅	$-0,1115R + 61,30$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 878$ кг/м ³)
C ⁵⁰ / ₆₀	$-0,0993R + 69,32$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 1052$ кг/м ³)

Заключение. Результаты исследований показывают, что для расчета (прогнозирования) величин предельной карбонизации бетона можно пользоваться укрупненной зависимостью ПБК = $f(\rho, R)$, представленной в таблице 2 с достаточной точностью. Кроме того, при проектировании ЖБЭ (ЖБК) для укрупненной оценки их проектной долговечности возможно использование зависимостей ПБК = $f(\rho_{пл}, R)$ и ПБК = $f(\rho_{гр}, R)$, приведенных в таблицах 3 и 4 соответственно. Необходимо отметить, что полученные зависимости используются при известных, либо прогнозируемых составах бетонной смеси.

Список литературы

- 1 Васильев, А. А. Карбонизация и оценка поврежденности железобетонных конструкций : [монография] / А. А. Васильев. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 263 с.
- 2 Васильев, А. А. Карбонизация бетона (оценка и прогнозирование) : [монография] / А. А. Васильев. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 303 с.
- 3 Васильев, А. А. Оценка и прогнозирование технического состояния железобетонных конструкций с учетом карбонизации бетона : [монография] / А. А. Васильев. – Гомель : БелГУТ, 2019. – 215 с.
- 4 Васильев, А. А. Модель карбонизации бетона в атмосферных условиях / А. А. Васильев // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2009. – № 12. – С. 69–82.
- 5 Васильев, А. А. Совершенствование методов оценки технического состояния железобетонных элементов, эксплуатирующихся в условиях атмосферной агрессии / А. А. Васильев // Строительная наука и техника. – 2012. – № 2 (41). – С. 21–28.
- 6 Васильев, А. А. Критерии оценки технического состояния железобетонных элементов по физико-химическим характеристикам бетона / А. А. Васильев // Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов Европейского союза в области строительства : сб. науч.-техн. статей. В 2 ч. Ч. 2. – Минск : БНТУ, 2012. – С. 39–47.
- 7 Васильев, А. А. Комплексный метод оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных элементов и конструкций, эксплуатируемых в воздушных средах / А. А. Васильев, Д. Н. Шевченко // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. – Минск : Издатель А. Н. Вараксин, 2014. – Вып. 6. – С. 59–67.
- 8 Васильев, А. А. Математическая расчетно-экспериментальная модель начальной карбонизации бетона / А. А. Васильев, Д. Н. Шевченко // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2016. – № 2 (33). – С. 176–179.
- 9 Васильев, А. А. Оценка применимости бетонов в железобетонных элементах и конструкциях для различных эксплуатационных условий / А. А. Васильев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2017. – № 2 (35). – С. 133–135.
- 10 Васильев, А. А. Совершенствование оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных элементов и конструкций, эксплуатирующихся в различных атмосферных условиях / А. А. Васильев // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. – Минск, 2017. – Вып. 9. – С. 148–167.

11 Анализ предельной величины карбонизации бетона для различных классов бетона по прочности на сжатие / А. А. Васильев [и др.] // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2022. – № 1 (44). – С. 88–90.

12 **Васильев, А. А.** Оценка предельной величины карбонизации бетона / А. А. Васильев, Ю. К. Кабышева, Н. А. Леонов // SCIENCE AND EDUCATION: PROBLEMS AND INNOVATIONS : сб. ст. VIII Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : МЦНС «Наука и просвещение», 2021. – С. 22–25.

Получено 21.02.2024

A. A. Vasilyev, J. K. Kabysheva, M. I. Tkacheva, K. E. Ageeva. Carbonization limit analysis for mobile mixtures concretes of compressive strength classes $C^{12}/_{15}-C^{50}/_{60}$.

The necessity to study boundary values of concrete carbonization is shown. The invention proposes the characteristic of the ultimate concrete carbonization (LVC index). Method of simplified calculation of LVC index and $LVC = f(C, R)$ dependence obtained on its basis is proposed. Calculations of the LVC index were made and mathematical dependencies of the LVC index on the amount of cement used and the concrete tempering strength for concretes of various classes in terms of compressive strength, non-additive mixtures of grades in terms of P1–P5 workability were given. The application of various dependencies of the LVC calculation was analyzed.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА

УДК 658.5

В. В. БУРЧЕНКОВ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ ПО ПРОДЛЕНИЮ СРОКОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ СТРЕЛОЧНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДОЛОГИИ УРРАН

Приведены результаты исследований неисправностей стрелок и причин их возникновения. Установлены причины отказов деталей и механизмов стрелочных электроприводов и методика их устранения. Разработана технология повышения надежности функционирования электродвигателей и других ответственных узлов стрелочных электроприводов. Обоснована методика принятия решений о продлении сроков эксплуатации электроприводов с истекшим нормативным сроком службы. Определена экономическая эффективность службы электроприводов с продленным сроком эксплуатации.

Введение. В настоящее время назрела необходимость в радикальном повышении эффективности целого ряда основных производственных процессов. Наглядным примером актуальности данной проблемы является то, что на отдельных участках железнодорожных линий более 70% объектов инфраструктуры функционируют с превышением назначенного срока службы и с каждым годом этот показатель растет. Из-за недостатка финансовых ресурсов вместо регламентной замены распространенной практикой является неоднократное продление назначенного срока службы. Одним из наиболее ответственных элементов в железнодорожной инфраструктуре является стрелочный перевод. Часто крушения и сходы поездов происходят именно на них. При этом поток отказов в работе различных устройств на стрелках, в том числе отказов стрелочных электроприводов (СЭП), приводит к значительным техническим рискам, связанным с их эксплуатацией.

Согласно информации на официальном сайте ОАО «РЖД» на сети железных дорог России насчитывается порядка 130,5 тысяч СЭП. Около 58,2% вышеуказанных СЭП выработали свой ресурс и нуждаются в замене или модернизации [1].

Совершенно очевидно, что оценка технического состояния СЭП с истекшим назначенным сроком службы и поэтапное продление их эксплуатации должно проводиться на основе научно обоснованных методов, обеспечивающих требуемые уровни безопасности и надежности перевозочного процесса. Выход из сложившейся ситуации видится в разработке методики оценки остаточного ресурса и совершенствовании технологии содержания СЭП с продленным сроком службы. Оценка остаточного ресурса СЭП выполняется методом объектного (узлового) анализа УРРАН, согласно которому предлагается проверять статистические данные, регистрируемые в информационных системах ОАО «РЖД», включая данные об отказах, предотказных состояниях и отступлениях от норм содержания [2].

Практика показывает, что в большинстве случаев брак, аварии и крушения на стрелках происходят из-за нарушений ПТЭ, при производстве работ по техническому обслуживанию и ремонту устройств СЦБ. Оценка остаточного состояния СЭП после назначенного срока службы базируется на анализе неисправностей и причин их возникновения, которые приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные неисправности стрелок и причины их возникновения

Характерные неисправности	Вероятная причина неисправности
При переводе стрелки электродвигатель потребляет повышенный ток	Загрязнены или не смазаны башмаки, сильно затянуто корневое крепление
В конце перевода стрелки амперметр показывает значительное возрастание тока	Сильно затянуто корневое крепление, вызывающее пружинность остряка, слишком плотное прижатие остряка, накат на рамном рельсе, сужение колеи у остряков
При переводе спаренных стрелок амперметр фиксирует нормальный перевод первой стрелки и затем ток исчезает. Контроль положения стрелок отсутствует. При обратном переводе стрелки контроль восстанавливается	Обрыв рабочей цепи между стрелками, как правило, на контактах автопереключателя первой переводимой с поста стрелки
Стрелка не переводится, амперметр фиксирует повышенный ток. При возвращении рукоятки (нажатии кнопки) в прежнее положение амперметр сразу же показывает отсутствие тока, контроль положения стрелки мгновенно восстанавливается	Стрелка заперта накладкой, заклинился шибер из-за отсутствия смазочного материала на запорных зубьях шибера
Стрелка не переводится, амперметр показывает пониженный против нормы ток	Ослабло фрикционное сцепление
При прохождении по стрелке поезда теряется контроль ее положения	Зазор между зубом ножевого рычага и вырезом контрольной линейки почти отсутствует, т. е. не соответствует норме 1–3 мм
Рабочее напряжение на электродвигатель поступает, но якорь не вращается	Обрыв цепи между секцией обмотки якоря и коллекторной пластиной. Обрыв обмотки якоря или обмотки возбуждения
При работе электродвигателя наблюдается сильное искрение щеток	Загрязнение коллектора, слабое нажатие щетки на коллектор

Отказы СЭП в основном происходят из-за нарушения контакта автопереключателя (53 %), неисправности электродвигателя (30 %), механической передачи (8 %), нарушения контакта блокировочного устройства (4 %), заклинивания шибера (3 %) и др.

Установлены следующие неисправности электродвигателей постоянного тока и причины их возникновения.

1 Искрение щеток (при вращении якоря в одну сторону щетки искрят сильнее, чем при вращении в другую), плохое состояние щеток, неправильная установка щеткодержателей, слабое или слишком сильное нажатие на коллектор, возвышение одних пластин коллектора над другими, короткое замыкание в якоре, биение коллектора.

2 Электродвигатель медленно увеличивает частоту вращения и перегревается – излишне длительное включение; повторно кратко временный режим работы; работа на фрикцию; плохой ход из-за короткого замыкания, обрыва в одной или нескольких секциях якоря или замыкания между пластинами коллектора, а также из-за отсутствия смазочного материала в подшипниках.

3 Отсутствие вращения электродвигателя после включения: перегорание предохранителей; отсутствие щеточного контакта; обрыв в обмотке возбуждения или якоря.

Возможны следующие неисправности электродвигателей переменного тока и их причины.

1 Перегрев обмотки и сердечника статора: повышенное напряжение сети; при перегрузке электродвигателя сообщение витков в обмотке статора; неправильное соединение выводных концов обмоток; короткое замыкание между фазами.

2 Электродвигатель медленно увеличивает частоту вращения, ротор перегревается; плохой контакт между стержнями обмотки и коротко замыкающими кольцами из-за разрыва стержня или отрыва от кольца; обрыв в одной фазе статора при включении обмоток электродвигателя «звездой».

3 Отклонение в меньшую сторону от номинальной частоты вращения электродвигателя при номинальной нагрузке; пониженное напряжение сети; недостаточный контакт в цепи ротора или включение обмотки «звездой» на напряжение 127 В.

4 Неустойчивость работы электродвигателя: обрыв в фазе.

Обмотка якоря представляет собой замкнутую цепь, состоящую из 24 последовательно соединенных секций. При обрыве одной или нескольких секций в одной половине обмотки сопротивление якоря увеличивается вдвое. Для двигателя МСП-0,25 нормальное сопротивление якоря составляет 6 Ом, а при обрыве секций – 12 Ом.

Током нормального перевода называется ток, потребляемый электроприводом во время перевода стрелки. Его значение зависит от усилия, требуемого на перемещение остряков данного типа стрелочного перевода с учетом его состояния и типа электродвигателя.

Эти факторы могут приводить к увеличению переводного усилия в 2–3 раза относительно минимального значения и в 1,3–1,6 раза относительно среднего значения. По данным [3], коэффициент трения остряков о подушки может принимать значения 0,2–0,3. Нормативные значения усилия перевода стрелки для наиболее распространенных типов стрелочных переводов приведены в таблице 2. Зная усилие перевода стрелки, легко определить ток нормального перевода по графикам зависимости $I = f(F)$ (рисунок 1) для различных типов электроприводов и электродвигателей. Например, для стрелки Р65–1/11 с электроприводом типа СП-6 и электродвигателем типа МСП-0,25-160 В усилие перевода стрелки составляет 1,1–1,7 кН (см. таблицу 2), а ток нормального перевода должен быть равен 1,7–2,1 А (см. рисунок 1, а). Аналогично определяются усилия перевода стрелки с электроприводами СП-8. Нормативные усилия перевода стрелки, указанные в таблице 1, соответствуют исправному состоянию стрелки и хорошему качеству смазки ее частей.

Таблица 2 – Нормативные усилия перевода стрелки

Тип рельсов и марка крестовины	Вид корневого крепления	Нормативное усилие перевода стрелки F , кН	Максимальное вероятное усилие, кН	Коэффициент увеличения K при несмазанной стрелке
Р43–1/9; 1/11	Шкворневое	0,7–1,0	1,2	1,5
Р431–1/9; 1/11	Вкладышно-накладное	0,3–1,1	1,5	1,4
Р50–1/9; 1/11	То же	0,8–1,2	1,6	1,4
Р65–1/9; 1/11	»	1,1–1,7	2,2	1,6
Р50–1/1S	»	1,9–2,3	3,1	–

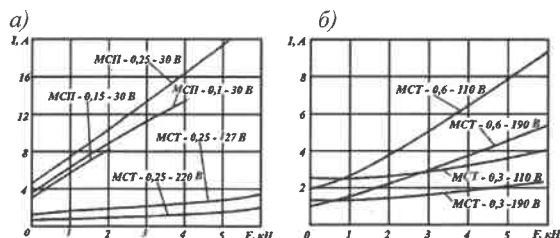


Рисунок 1 – Характеристики зависимости тока $I = f(F)$ для электроприводов типа СП-6 (а) и СП-8 (б) с электродвигателем различных типов

Максимальные усилия вдвое превышают минимальные и могут быть в 1,3–1,5 раза больше нормативных значений. Для учета этой особенности допустимые токи нормального перевода рассчитываются исходя из максимальных вероятных усилий перевода стрелки (см. таблицу 2). Ток, потребляемый электроприводом при работе электродвигателя на фрикцию (когда перевод стрелки не закончен и остряки не замкнуты), не зависит от состояния стрелки и определяется только регулировкой фрикционного сцепления, которая осуществляется затягиванием или ослаблением гайки фрикционной муфты.

Согласно Инструкции ЦШ/3820 при работе электродвигателя на фрикцию ток должен превышать ток нормального перевода стрелки в 1,25–1,3 раза. Разность токов электродвигателя при работе электропривода на фрикцию в сторону плюсового и минусового положений не должна превышать 10 % среднего арифметического значения обоих токов.

Наиболее уязвимым местом электропривода является автопереключатель. Неисправности контактов автопереключателя составляют 43–45 % общего числа отказов электроприводов. Отказы контактов автопереключателя возникают из-за неправильной регулировки, излома ножевых и контактных колодок, контактных пластин, рычагов, контрольных линейек и др. Большие допуски изготовления колодок и ножей, расхождения в размерах отверстий для крепления, низкое качество литья зачастую приводят к изломам колодок и ножей.

Нарушение электрического контакта между контактными пружинами и ножами автопереключателя происходит из-за понижения контактного нажатия менее 4 Н, излома карболитовых колодок, подгара контактов, уменьшения глубины врубания ножей в контактные пружины менее 9 мм, индентации или обледенения контактов, износа осей крепления ножевого рычага, повышения влажности внутри электропривода.

Фрикционные муфты выходят из строя из-за заклинивания дисков фрикционного сцепления, обусловленного износом дисков и перекосом трущихся поверхностей, отсутствия смазки на поверхности дисков, ослабления фрикции при резком понижении температуры (мороз) и резком повышении температуры (при смене сезона) смазки внутри муфты.

Неисправности редуктора возникают из-за заклинивания шестерен вследствие износа зубьев шестерен, вытекания масла из коробки редуктора из-за неисправности сальника и отсутствия смазки на поверхностях зубьев.

Шибера и шиберная шестерня выходят из строя из-за заклинивания вследствие износа запорных зубьев шибера и шиберной шестерни, отсутствия смазки на их поверхностях, неправильной регулировки зазора между острием и рамным рельсом после производства ремонтных работ на стрелке.

Курбельный контакт (блок-контакт) выходит из строя из-за излома арматуры и развинчивания крепежной гайки под воздействием вибраций и ударов от прохода колесных пар подвижного состава с ползунами по стрелочному переводу.

Контрольные линейки подвержены изломам в местах выреза для западания зуба ножевого рычага автопереключателя, излому ушек в соединении с контрольными тягами из-за усталости металла, наличия микротрещин, некачественной приварки ушек в заводских условиях, вибрации. Оказывают влияние сила удара зуба ножевого рычага в скос контрольной линейки и сила давления зуба при отсутствии зазора между ним и скосом контрольной линейки, вибрация.

Техническое обслуживание регламентировано Инструкцией ЦШ 3820. Перечень основных работ по техническому обслуживанию СЭП и периодичность

их выполнения определены в зависимости от классификации железнодорожных линий, предусматривающей пятиклассную структуру. Ряд работ выполняются по результатам осмотров. Учтены цифровые характеристики неисправностей и дефектов деталей и узлов, необходимые для оценки остаточного ресурса СЭП с истекшим назначенным сроком службы.

По истечении назначенного срока службы СЭП должно быть принято решение: направление в ремонт, списание, уничтожение, проверка и установление нового назначенного срока.

Продлению срока службы подлежат СЭП с истекшим нормативным сроком эксплуатации либо подвергшиеся непредусмотренным технической документацией воздействиям (за исключением взреза стрелки).

Ремонт и освидетельствование СЭП с истекшим нормативным сроком службы осуществляют в специализированном РТУ дистанции сигнализации и связи (ШЧ). Стрелочные электроприводы разбирают; чистят, промывают и сушат их детали; заменяют износившиеся части; окрашивают поверхности деталей; смазывают, проверяют и регулируют электродвигатели; маркируют, оформляют результаты ремонта и осмотра. Результаты освидетельствования сверяют с нормативными значениями технических показателей для допуска СЭП к эксплуатации по истечении назначенного срока службы [3].

Для организации оценки фактического состояния СЭП с истекшим назначенным сроком службы и установления возможности дальнейшей эксплуатации СЭП назначается квалификационная комиссия. В случае заключения о возможности дальнейшей эксплуатации СЭП, квалификационная комиссия принимает решение:

- а) о сроке следующего освидетельствования СЭП;
- б) о необходимости изменения периодичности осмотра отдельных деталей и механизмов СЭП;
- в) о проведении технических мероприятий по повышению надежности деталей и механизмов СЭП с указанием сроков выполнения.

Решения квалификационной комиссии оформляются соответствующим актом с приложениями в виде ведомостей и методик проверки технического состояния СЭП.

Согласно информации на официальном сайте ОАО «РЖД» на сети железных дорог России около 16,42 % СЭП ежегодно, после ремонта и освидетельствования эксплуатируются с продленным на 10 лет сроком службы [4].

В целях повышения безопасности движения поездов, совершенствования ремонта устройств железнодорожной автоматики, телемеханики и связи, повышения производительности труда на Белорусской железной дороге разработан и введен в действие стандарт организации СТП БЧ 19.366–2018 [5]. Изменения и дополнения, внесенные в данный стандарт, актуализируют требования к ремонту и освидетельствованию СЭП при определении назначенных сроков службы и межремонтных сроков капитального ремонта.

Основные виды работ для стрелочных переводов связаны с заменой или ремонтом СЭП (заменой и ремонтом составных частей), устранением люфтов в

шарнирных соединениях, при необходимости перезаделкой стрелочных и кабельных муфт, заменой изоляционных прокладок и проводов в шланге для прокладки монтажа, обновлением маркировки.

На железнодорожных станциях 4-го и 5-го классов, путевых постах, разъездах, обгонных пунктах, расположенных на малоделятельных участках, на путях необщего пользования планируется продление назначенного срока службы СЭП по результатам проведения комиссионного обследования их состояния в РТУ СЦБ. При положительном решении рабочей комиссии по обследованию состояния систем СЦБ и их элементов о возможности их дальнейшей эксплуатации с оформлением акта и указанием срока следующего комиссионного обследования определяется новый нормативный срок службы СЭП продолжительностью 10 лет и более. Технические показатели деталей и узлов, а также СЭП в целом, разрешенных для продления сроков эксплуатации, должны соответствовать стандарту СТП БЧ 19.275-2013 [6].

Технология выполнения этих работ предполагает разработку соответствующей методики.

Установлено, что суммарная продолжительность продлений назначенного срока службы СЭП не должна превышать половину среднего срока службы в соответствии со стандартом СТП БЧ 19.366–2018 [5].

При оценке технического состояния СП-6 (М; Бел), с целью продления срока службы выявляются детали и узлы, подлежащие ремонту. Неремонтопригодные механизмы СЭП заменяются новыми изделиями.

При определении целесообразности эксплуатации стрелочных электроприводов с продленным сроком эксплуатации важным фактором является экономическая эффективность. Технико-экономическое обоснование устанавливает, что эксплуатация СЭП с истекшим сроком службы должна удовлетворять экономическим требованиям по единовременным затратам, эксплуатационным расходам, надежности, потреблению электроэнергии и т. п. Методика определения экономической эффективности эксплуатации новых СЭП и эксплуатации электроприводов с продленным сроком эксплуатации основана на сопоставлении стоимостных и натуральных показателей, характеризует продление эксплуатации СЭП с истекшим сроком службы в целом как с технической точки зрения, так и с экономической стороны. Эффективность рассматриваемого предложения выявляется путем сравнения технико-экономических показателей СЭП с истекшим сроком службы с показателями использования новых электроприводов.

На основании статистических данных сформирована расчетная калькуляция расходов по эксплуатации новых стрелочных электроприводов типа СП-6Бел, изготавливаемых на Гомельском электротехническом заводе и электроприводов с истекшим нормативным сроком службы, с учетом расходуемых запасных частей (таблица 3). Аналогичные статистические данные рассмотрены для СЭП, производимых в Российской Федерации в Брянском ЗАО «Термотрон-Завод» и поставляемых на Белорусскую железную дорогу.

Таблица 3 – Калькуляция эксплуатационных расходов для нового электропривода типа СП-6Бел и оборудования, используемого на электроприводе с продленным сроком эксплуатации

Оборудование и затраты	Единица измерения	Количество	Стоимость, руб.	
			Комплект нового электропривода СП-6Бел	Комплект электропривода СП-6Бел с продленным сроком эксплуатации
Электропривод СП-6Бел	комплект	1	4300,0	645,0
Электродвигатели	шт.	1	–	450,0/150,0
Фрикционная муфта	узел	1	–	230,0
Жгут проводов	шт.	1	–	120,0
Контактные колодки автопереключателя	руб.	–	–	140,0
Сальники уплотнений шибера, контрольных линеек	комплект	1	–	40,0
Непредвиденные отказы деталей электроприводов	руб.	–	215,0	215,0
Итого			4515,0	1840,0
Транспортные расходы	%	4	172,0	172,0
ВСЕГО			4687,0	2012,0

Примечание – Остаточная стоимость электропривода типа СП-6Бел с истекшим 20-летним сроком эксплуатации принята равной 645,0 руб.; стоимость нового электродвигателя МСП-0,25 составляет 450,0 руб.; стоимость отремонтированного электродвигателя МСП-0,25 равна 150,0 руб.; непредвиденные отказы деталей СЭП приняты равными 5 % от первоначальной стоимости и составляют 215,0 руб.

Стоимость ревизии и ремонтных работ от остаточной стоимости комплекта стрелочного электропривода типа СП-6Бел определена в размере 7,5 % и составила 48,37 руб. Стоимость материалов, не учтенных ценниками, от остаточной стоимости стрелочного электропривода определена аналогичным образом и равна 48,37 рублей. Удорожание стоимости ревизии и ре-

монтных работ вследствие их малого объема определено в размере 3 % и составило 19,35 руб. Накладные расходы определены в размере 15,8 % и составили 101,9 руб.

Амортизационные отчисления, дополнительная заработная плата электромехаников с начислениями, определены на основе среднегодового количества об-

служиваемого оборудования (10,5 тысяч комплектов СЭП на полигоне Белорусской железной дороги) и действующих норм расходов на единицу, цен на материалы и запасные части. Расходы на оплату электроэнергии приняты такими же, как и при эксплуатации СЭП рабочего ресурса и не учитываются в суммарных эксплуатационных расходах для электроприводов с продленным сроком эксплуатации.

Определение годовой экономической эффективности эксплуатации стрелочных электроприводов с продленным сроком эксплуатации осуществлено с учетом сокращения ежегодных закупок новых электроприводов с 500 комплектов до 325. Общая годовая экономия денежных средств при эксплуатации СЭП с продленным сроком службы, в масштабе Белорусской железной дороги, составит 281665,0 руб.

Заключение. Выполненные исследования обосновывают разработку стандарта организации СТП БЧ для Белорусской железной дороги по оценке технического состояния СЭП при продлении сроков эксплуатации. Необходимо детализированное технико-экономическое обоснование перспективности организации работ по продлению сроков службы СЭП с истекшим нормативным сроком службы на 10 лет и более.

Получено 09.02.2024

V. V. Burchankov. Decision making to extend the operation life of point electric drives based on the URRAN methodology.

The results of studies of arrow malfunctions and the causes of their occurrence are presented. The causes of failures of parts and mechanisms of switch electric drives and methods for their elimination have been established. A technology has been developed to improve the reliability of the operation of electric motors and other critical components of switch electric drives. The methodology for making decisions on extending the service life of electric drives with an expired standard service life is substantiated. The economic efficiency of the service of electric drives with an extended service life has been determined.

Список литературы

1 **Хорошев, В. В.** Непрерывный контроль механических параметров подвижных элементов стрелочных электроприводов / В. В. Хорошев // Автоматика на транспорте. – 2017. – Т. 3. – № 1, С. 69–83.

2 Оценка остаточного ресурса стрелочных электроприводов / Н. В. Бугреев [и др.] // Наука и бизнес: пути развития. – 2019. – № 4 (94). – С. 36–41.

3 **Белоусов, С. В.** Проявление неисправностей стрелочных переводных устройств с электродвигателями переменного тока на графике мощности перевода / С. В. Белоусов // Автоматика на транспорте. – 2018. – Т. 4, № 4. – С. 632–654.

4 Методическое руководство по управлению ресурсами и рисками в хозяйстве автоматики и телемеханики на основе методологии URRAN : утв. Управлением автоматики и телемеханики Центральной дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД» от 5.03.2012 г. № 334. – 167 с.

5 СТП БЧ 19.366–2018. Организация ремонта технических средств в хозяйстве сигнализации и связи. Сроки службы и межремонтные сроки основных устройств и оборудования железнодорожной автоматики, телемеханики и связи : утв. 07.02.2018 г. № 118НЗ; с изм. № 2 от 30.11.2022 № 939 НЗ г. – Минск, 2018.

6 СТП БЧ 19.275-2013. Технологический процесс ремонта и проверки аппаратуры сигнализации, централизации и блокировки. Стрелочные электроприводы : утв. 23.12.2013 г. № 1263НЗ. – Минск, 2013.

УДК 656.05

А. А. МИХАЛЬЧЕНКО, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ПЛАНИРОВАНИЕ ПОГРУЗОЧНЫХ РЕСУРСОВ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ В НОВЫХ ГЕОПОЛИТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Приведены результаты исследований обеспечения погрузочными ресурсами железной дороги по видам отправок в условиях кардинального изменения направления грузопотоков. Используются нетрадиционные методы планирования и прогнозирования грузовых отправок. Рассматриваются новые пути решения информационного обеспечения в условиях функционирования информационных сетей и искусственного интеллекта. При решении эксплуатационных задач планирования перевозочного процесса с учётом новых направлений грузопотоков рассматриваются случаи с использованием ресурсов не складированного типа, которые невозможно накапливать для последующего этапа погрузки.

Погрузочные ресурсы железной дороги – это плановое количество порожних вагонов, пригодных под погрузку установленной номенклатуры грузов на железной дороге. Их наличие в современных условиях тесно связано с качеством перевозочного процесса. В Беларуси 2024 г. объявлен годом качества. С учётом этого повышение качества транспортного обслуживания грузовладельцев должно рассматриваться не только как средство повышения эффективности функционирования отдельных транспортных и товарных рынков, но и как инструмент роста глобальной конкурентоспособности страны, повышения эффективности всей системы товародвижения в стране [1]. Особенности отгрузки продукции агропромышленного комплекса в стране тесно связаны с состоянием рынка экспорта и импорта. Экспортные грузы перевозятся в основном массово в полувагонах, цистернах и специальных вагонах, импортные – в крытом подвижном составе. Разнообразие используемого подвижного состава показано на рисунке 1.

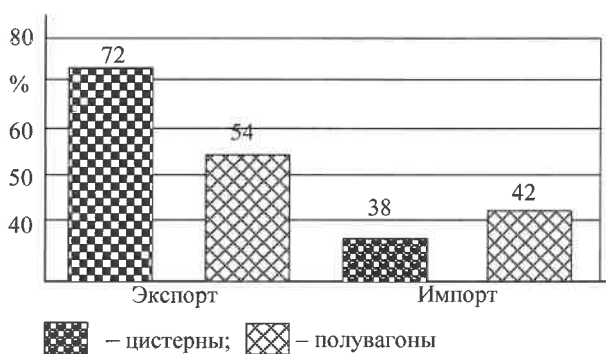


Рисунок 1 – Долевое распределение вагонов по видам перевозок грузов

Из приведенных на рисунке 1 диаграмм видно, что поступление грузов в страну в цистернах составляет 38 %. В результате имеется недостаток в цистернах в размере 34 %. Он может восполняться за счёт присылки цистерн с железных дорог других государств (в основном из России).

При работе с полувагонами для выполнения погрузки массовых грузов имеется их избыток в размере 14 %. В результате полувагоны в таком количестве направляются в порожнем состоянии на станции других государств. Возрастает объём порожнего пробега вагонов,

что увеличивает себестоимость перевозок экспортных и импортных грузов.

В условиях санкций со стороны стран ЕС товародвижения с Беларусью и Россией произошло изменение направления движения товаров с западного на восточное и северное. С учётом того, что Беларусь является преимущественно экспортной страной (экспорт превышает импорт по отдельным позициям в пять-шесть раз), при выполнении погрузки экспортных грузов играет важную роль система ресурсного обеспечения погрузки Белорусской железной дороги. В результате основную цель данного исследования можно рассматривать как выбор методологии формирования модели обеспечения погрузочными ресурсами и реализации конкурентной стратегии железнодорожного транспорта при определении норматива их обеспечения.

Новые геополитические условия работы железнодорожного транспорта Беларуси привели к негативным последствиям с потерей существенной доли доходов, получаемых от технологической подготовки вагонов к погрузке. Это связано с тем, что техническую работу с вагонами выполняют транспортные предприятия перевозчика, который владеет вагонным парком. При этом:

1) весь объём технологических работ по подготовке вагонов к перевозке полностью исключён из регламента на Белорусской ж. д.;

2) приспособление грузовых вагонов для специальных перевозок выполняется частично силами белорусских ремонтных предприятий;

3) текущий ремонт порожних вагонов при комплексной подготовке к перевозкам с отцепкой от состава или групп вагонов с подачей их на ремонтные пути (ТР-1) выполняется только по необходимости, если технологический период межремонтного цикла исчерпан или имеется техническая неисправность вагона;

4) техническое обслуживание грузовых вагонов, находящихся в составах, без отцепки от состава или группы вагонов (ТО) производится при состоянии вагона, ставящем под угрозу безопасность движения поездов;

5) текущий ремонт грузовых вагонов с отцепкой, выполняемый на путях текущего отцепочного ремонта, а также выполняемый на специализированных путях станции (ТР-2) производится в отдельных случаях и не носит постоянного характера;

6) перестановка грузовых вагонов с одной колеи на другую при пересечении государственной границы практически сокращено до нуля; это связано с санкциями стран ЕС на перевозку сжиженного газа;

7) деповской ремонт грузовых вагонов при использовании грузовых вагонов иностранных перевозчиков для этой категории исключён; собственный парк используется ограничено на сети иностранных государств, что приводит к сокращению объёма ремонтных работ по данной программе ремонта в белорусских вагонных депо;

8) техническое обслуживание и ремонт контейнеров напрямую связан с использованием ресурсов ремонтных предприятий; с учётом того, что в контейнерах собственности иностранных железнодорожных администраций поступает в основном импортный груз и контейнеры отправляются обратно в порожнем состоянии, техническое обслуживание их силами белорусских ремонтных предприятий не выполняется;

9) капитальный ремонт грузовых вагонов (КРП) по техническим условиям производится только с вагонами национального парка.

Долевое распределение расходов на техническую эксплуатацию грузовых вагонов показано на рисунке 2.

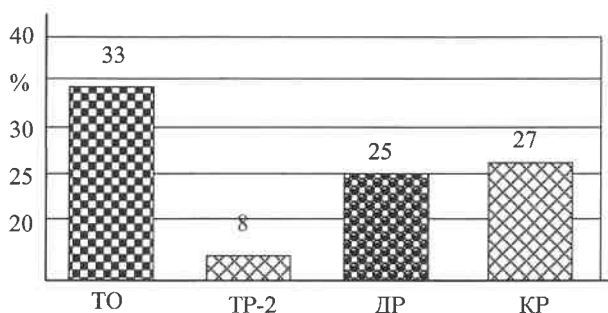


Рисунок 2 – Долевое распределение расходов на техническую эксплуатацию грузовых вагонов:

ТО – техническое обслуживание; ДР – деповской ремонт; ТР-2 – текущий ремонт-2; КР – капитальный ремонт

Из приведенных на рисунке 2 диаграмм видно, что из оставшихся доходов после изменения геополитических условий основная доля приходится на техническое обслуживание иностранных вагонов. На эту долю использования ресурсов вагонных депо приходится 33 %.

Основным методом для данного исследования является системный подход к изучению экономических процессов функционирования погрузочных ресурсов железнодорожного транспорта в рыночной среде и новых направлениях перевозок. В исследовании использованы методы экономико-математического моделирования, статистического анализа, технико-экономических расчётов и вариационного исчисления.

Следует учитывать, что практическая деятельность по повышению качества транспортного обслуживания грузовладельцев в стране невозможна без предварительной разработки системы управления качеством в современных условиях работы отрасли. В данной сфере существует ряд проблем.

1 Наиболее систематизированные из существующих подходов к управлению качеством на транспорте во многом связано с качественным состоянием погрузочных ресурсов.

2 В стране, наряду с элементами рыночной, на крупных предприятиях, которые отгружают до 87 % грузов, в основном плановая экономика. Для условий плановой экономики государственного железнодорожного транспорта наблюдается ориентированность в основном на повышение качества внутренних технологических процессов работы транспортных предприятий.

3 Недостаточно чётко сформулирована терминология управления качеством транспортного процесса на железной дороге и нет единого толкования понятий «качество транспортного обслуживания», «стандарт качества».

4 Отсутствует научно обоснованная система управления качеством транспортного обслуживания по грузовым перевозкам, соответствующая интересам железнодорожного транспорта и экономики страны, не определена её структура, границы, порядок взаимодействия с другими системами.

Современные модели управления качеством ресурсного обеспечения погрузки не находят практического применения по следующим причинам:

1) отсутствие информационной базы и соответствующих статистических материалов, для получения и использования которых используются современные технологии, базирующиеся на использовании искусственного интеллекта;

2) ограниченное использование результатов мониторинга уровня качества погрузочных ресурсов на системном уровне по большинству отдельных показателей эксплуатационной работы железных дорог [2].

Предлагаемые различными авторами модели управления качеством транспортного обслуживания и ресурсного обеспечения погрузочными ресурсами по некоторым показателям зачастую несопоставимы между собой. Это затрудняет комплексную оценку качества обеспечения погрузочными ресурсами клиентов железной дороги. Следует отметить следующее: 1) отсутствует эффективная система стандартов качества транспортного обслуживания грузоотправителей; 2) существующие государственные стандарты в данной сфере носят общий характер и не соответствуют маркетинговой идеологии стандартов серии ИСО 9000 2000; 3) этим стандартам соответствует использование логистики управления движением поездов, которая напрямую связана с погрузочными ресурсами (подсылка порожних вагонов необходимой номенклатуры по международным коридорам) [3].

При разработке системы планирования проблема обеспечения перевозочного процесса погрузочными ресурсами рассматривается с нескольких сторон:

– в организационном – требуется выполнение расчёта трудоёмкости затрат при разработке плана погрузки и численности персонала, занятого планированием;

– функциональном – выполнение расчётов самого плана, его эффективности по критерию своевременности (продолжительность его прохождения по уровням управления до начала реализации);

– по критерию полноты охвата событий, связанных с отправлением экспортных грузов, и прогноза их наступления по станциям железной дороги.

Современный подход к организации экспортных перевозок грузов железнодорожным транспортом диктует изменение технологии, технических условий работы. Лучший вариант в данном случае представляет переход к полигонным технологиям ресурсного обеспечения погрузки. Переход на полигонные технологии начался с внесения изменений в технологию управления хозяйством движения при формировании плана погрузки и обеспечения погрузочными ресурсами станций отправления грузов. Полигоном управления перевозочным процессом в таком случае называют объединение участков сети, обладающих единой технологией работы подвижного состава, похожую инфраструктуру, зарождение и окончание производственных циклов при обслуживании общих грузопотоков с максимальным транспортно-логистическим эффектом.

Введение полигонной технологии управления погрузочными ресурсами может повлиять на изменение показателей эксплуатационной работы железных дорог по следующим позициям:

- повышение грузовых вагонов, используемых на кольцевых маршрутах, за счёт более высокой участковой скорости на основе увеличения уровня выполнения графика движения грузовых поездов;

- увеличение среднего веса грузового поезда за счёт обеспечения пропуска поездов более тяжёлого веса без перелома веса на основных направлениях полигона;

- снижение величины пробега локомотивов в одиночном следовании на основе эффективного диспетчерского контроля за выполнением сроков прохождения технического обслуживания и текущего ремонта;

- увеличение среднесуточной продуктивности вагонов рабочего парка за счёт улучшения показателей эксплуатационной работы причастных железных дорог.

Наряду с улучшением эксплуатационных показателей работы подвижного состава организация ресурсного обеспечения полигонов обеспечивает большой потенциал в снижении потерь в инфраструктурном комплексе. Это достигается за счёт эффективного использования подвижного состава – сокращения порожнего пробега, полноты загрузки вагонов с повышением нагрузки на них.

Практическая реализация полигонной технологии управления погрузочными ресурсами указывает её эффективность. Диаграммы, показывающие результативность данной технологии, показаны на рисунке 3.

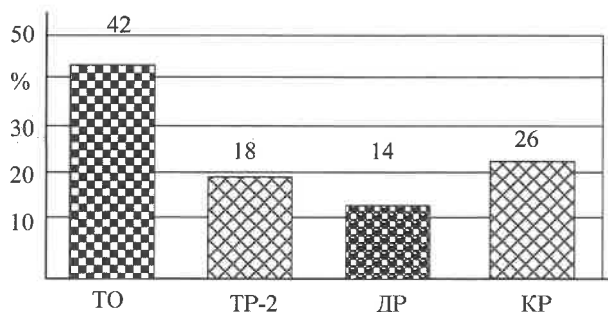


Рисунок 3 – Результативность использования полигонной технологии управления погрузочными ресурсами

Из приведенной на рисунке 3 диаграммы видно, что значительная часть ресурсов вагонного хозяйства железной дороги затрачивается на выполнение технического обслуживания вагонов (ТО).

При полигонной системе сохраняется трёхуровневое управление перевозочным процессом с принятием наиболее ответственных решений в связке центрального и регионального уровней. Такие решения определяют распределение погрузочных ресурсов, регулирование локомотивного и вагонных парков, предоставление «окон» для ремонтно-строительных работ на железнодорожной инфраструктуре [4, 5]. При анализе традиционного и полигонного методов планирования ресурсов получены следующие результаты:

- при традиционном методе порожний пробег цистерн составляет 42 %;

- полигонном методе – 29 %.

Процедура планирования обеспечения перевозочного процесса погрузочными ресурсами на начальном этапе происходит при недостатке информации относительно прогноза предстоящего внешнего возмущения потока событий по перевозкам и собственных возможностей по выполнению перевозок. Поэтому предусматривается возможность проведения корректировок ранее разработанных плановых решений в процессе их разработки. В таком случае план состоит из следующих решений:

- 1) объёмные показатели эксплуатационной работы – количество отправленных и выгруженных тонн грузов, тонно-километры брутто и нетто по видам сообщений, вагоно- и поезд-километры;

- 2) загрузка инфраструктуры и потребности в тяговых ресурсах;

- 3) потребности в трудовых, погрузочных, топливно-энергетических, информационных и финансовых ресурсах (в данном случае планирование рассматривается как элемент управления ресурсами) [7].

Процесс планирования погрузочных ресурсов, необходимых для выполнения плана перевозок грузов, состоит из комплексов взаимосвязанных задач, большинство из которых ограничено формализуемо и сводится к процедурам принятия решений путем перебора их вариантов. При этом используются математические модели и методы с решением мини-максных задач. В таком случае рассматриваются оптимальные задачи, возникающие при выборе состава разработки и определения очередности выполнения плановых решений, когда необходимо максимизировать линейную форму $\sum a_i x_i$, при наличии ограничений

$$\sum w_{ij} x_i < R_j, j = 1, J; \quad (1)$$

$$\sum r(B)_{ij} x_i > \max R_j, j = 1, J. \quad (2)$$

Для всех задач планирования ресурсного обеспечения перевозочного процесса должно выполняться дополнительное ограничение

$$w_{ij} x_i / r(B)_{ij} < T, [j = 1, I; j = 1, J. \quad (3)$$

В данном ограничении индекс i показывает номер задачи планирования, а I – полное количество задач, которые требуют решения в процессе управления ресурсами железной дороги, T – определяет продолжи-

тельность разработки и реализации плана погрузки, w_{ij} – ожидаемый эффект от реализации плана погрузки $(i - jq)$ -й задачи; x_i – переменная плана, которая принимается максимальное значение индекса I , если задача включается в список решаемых при разработке плана задач (в остальных случаях равна 0); j – индекс ресурсов, необходимых для разработки и реализации плана перевозок; J – количество видов погрузочных ресурсов; $w_{ij} = \sum r_{ij} dt$ – общая потребность j -го ресурса для разработки и реализации плана; $r(B)_{ij}$ – максимально допустимое значение $r(t)_{ij}$.

С учётом того, что $J = 1$, постановка задачи сводится к решению, требующему дополнительного осмысления. После определения состава разработки плана погрузки (особенно экспортных грузов) возникает задача оптимального или рационального распределения погрузочных ресурсов между составными задачами планирования. Определяется решение многоуровневой задачи – устанавливаются очереди обеспечения погрузочных ресурсов с учетом принадлежности вагонов и грузов. В новых геополитических условиях транспортная составляющая производства и реализации товаров зависит от факторов: принадлежности вагонного парка, отношения производителя по фактору государственности, договорных обязательств и стратегии распределения грузопотоков по внешнему периметру страны. В результате требуется другая постановка задачи. В постановочной части требуется определить $r(t)_{ij}$, при максимизации линейной формы $\sum a_i (T - \beta_i)$, при наличии ограничений

$$\sum r(t)_{ij} < R_j(t); j = 1, J; \quad (4)$$

$$\sum r(\alpha_{ij}; \beta_{ij}) = W_{ij} < R_j(t); i = 1, I; j = 1, J, \quad (5)$$

где α_{ij} , β_{ij} – моменты начала и окончания использования j -го ресурса для i -й задачи, $\beta_{ij} = \max t_{ij}$ – момент окончания разработки i -й задачи.

С учётом особенностей работы железнодорожного транспорта дополнительные технологические ограничения на порядок исполнения задач планирования могут быть заданы в виде графа $G = (I, \Gamma)$, где I – множество решаемых задач; Γ – множество задач, предшествующих i -й задаче (при $i = 1, I$).

При решении эксплуатационной задачи и планирования перевозочного процесса рассматриваются случаи с использованием погрузочных ресурсов не складываемого типа, которые можно накапливать для последующего использования [6]. Например, можно просуммировать ресурсы $R_j(t)$ по всем j , приведя их предварительно к одной размерности, что будет выглядеть следующим образом:

$$\sum R_j(t) = R_j(t). \quad (6)$$

При выполнении условия (6) будет справедливым утверждение, что любой, чисто последовательный план будет не хуже параллельного плана, у которого для всех технологических работ при выполнении перевозочного процесса моменты начала и окончания одинаковы, а все β_i совпадают с T и $\sum a_i (T - \beta_i) = 0$.

При этом для любого чисто последовательного плана только для последней работы $\beta_n = T$, а остальные $(n - 1)$ значений $\beta_n < T$, $\sum a_i (T - \beta_i) > 0$.

Из приведенных рассуждений следует отметить, что для любого плана ресурсного обеспечения перевозочного процесса можно построить чисто последовательный план, который будет по своим параметрам лучше исходного с точки зрения критерия $\sum a_i (T - \beta_i)$.

При ресурсном обеспечении перевозок достаточно в подразделениях, для которых план является чисто параллельным, заменить его на любой последовательный, что в силу доказанного выше условия приведёт к увеличению предыдущего критерия.

Данное утверждение будет справедливым только при наличии ограничений на максимальное использование ресурсов, связанных с отгрузкой грузов: вагоны, ремонтная база, трудовые ресурсы. Это утверждение позволяет искать оптимальное решение задачи только среди последовательно реализуемых планов. Если последовательный план обозначить через x (i_1, i_2, \dots, i_n), то оптимальный план x (опт), определяющий очередность разработки и внедрения задач плана, может быть использован для частных случаев его реализации.

Например, если $R_j(t) = R$, то оптимальный план представляет собой последовательность решаемых задач, упорядоченную по убывающим значениям показателя $\max (a_i / w_i)$. Для нахождения оптимального плана ресурсного обеспечения при производном $R_j(t)$ может использоваться алгоритм, основанный на упорядоченном переборе возможных вариантов решения задачи планирования. При этом определяются этапы постепенного разбиения множества всех возможных решений на отдельные подмножества.

Для каждого подмножества выполняют вычисление значения оценки, которая является границей сверху или снизу для оценок всех решений данного подмножества. Верхняя граница устанавливается с учетом сложившихся условий потребности в погрузочных ресурсах.

Затем выбирают подмножество, для которого полученная оценка является экстремальной, и разбирают его аналогичным способом. Признаком оптимальности и окончания ветвей плановых решений является нахождение такого решения, характеристики которого превосходят оценки всех остальных подмножеств окончательного решения задачи планирования обеспечения погрузочными ресурсами.

Если общую задачу планирования погрузочных ресурсов следует рассматривать с учётом её ресурсного обеспечения, то все совместные задачи можно разбить на несколько групп в соответствующей очередности. Тогда разработки и реализация плана проводится последовательно по очередям ($q = 1, Q$). С учётом того, что продолжительность разработки g -й очереди не всегда может быть задана, она принимается равной T_g . Тогда, наряду с оптимальным распределением ресурсов внутри очереди, необходимо выбрать значения T_g с учётом влияния на все последующие очереди разработки плана с условием, чтобы максимизировать эффект от использования погрузочных ресурсов по каждой очереди плана и для плана в целом.

При решении такой задачи критерии времени и наличия погрузочных ресурсов рассматриваются как дискретные величины (период реализации и объём). В этом случае требуется определение величины x ;

(целые положительные числа, равные уровню использования ресурсов для i -й очереди при решении плановой задачи в m -й период времени), дающей максимальный эффект от очередности выполнения плановых работ. В таком случае

$$\sum a_i (T - \max y_i) \rightarrow \max, \quad (7)$$

$$y_i = m, \text{ если } x_i > 0; \quad (8)$$

$$y_i = 0, \text{ если } x_i = 0. \quad (9)$$

При наличии ограничений

$$\sum x_i(m) \leq R_i(m); \text{ при } m = 1, T; \quad (10)$$

$$\sum x_i(m) = R_i(m); \text{ при } m = 1, n; \quad (11)$$

$$x_i(m) \leq r_i(B). \quad (12)$$

Дополнительные ограничения на последовательность решения задач планирования погрузочных ресурсов могут быть заданы, как и раньше, в виде графа $G = (I, \Gamma)$. С учётом того, что разработка плана ведётся по очередям, то критерий (7) может быть записан через состояние транспортной организации в виде

$$z_{\tau_0} = \sum [\sum a_i (T_g - \tau_i) + \sum a_i T_g]. \quad (13)$$

Значение справедливо $\tau_i + \beta_i - \sum T_g$, когда T_g определяет момент $(q + 1)$ -й очереди начала разработки плана обеспечения погрузочными ресурсами как структурного элемента общего плана эксплуатационной работы и оценки предполагаемой потребности в ресурсах для его реализации. После преобразований (13) можно получить выражение, определяющее оптимальное состояние транспортной организации по условиям планирования, т. е.

$$z_{\tau_0} = \sum [\sum a_i (T_g - \tau_i) - T_g \sum a_i]. \quad (14)$$

Из (14) видно, что z_{τ_0} представляет сумму независимых друг от друга слагаемых, каждое из которых зависит только от очередности и продолжительности выполнения T_g .

Решение задачи сводится к последовательной оптимизации порядка разработка плана ресурсного обеспечения внутри самого плана и внутри каждой очереди и продолжительности разработки его очередей. Критерий оптимизации плана на каждом шаге примет вид

$$z_{\tau_0} = \sum a_i (T_g - \tau_i) - T_g \sum a_i. \quad (15)$$

Первый член правой части неявно зависит от T_g . Очевидно, что $z_{\tau_0} = \sum a_i (T_g - \tau_i)$ является неубывающей функцией T_g и определенной на $\max T_g$, при котором (15) достигает максимального значения и лежит в интервале $(\min T_g - \max T_g)$.

В условиях, когда все задачи планирования погрузочных ресурсов имеют одинаковое значение и являются однотипными, т. е. $\sum a_i = A$; $\sum w_i = W$; $k = K$, а I состоит из n последовательных решений задач планирования.

При таких условиях все задачи планирования объединяются в один этап, а условие такой задачи записывается в явном виде со сравнением величин $\sum \beta_i$ при последовательной разработке плановых задач

$$\sum \beta_i = \sum i (W/R) + 0,5 \sum i (i-1) KW/R, \quad (16)$$

а при разработке в один этап $\sum \beta_i = n^2 W/R$.

Если эти выражения сравнить, то элемент со значением $K = 3 / (n + 1)$ целесообразно разрабатывать план в один этап с последующими корректировками.

Для решения поставленной задачи необходимо ввести коэффициенты k_{ij} , характеризующие решение i -й задачи при условии, что j -я задача уже реализована в эксплуатационной работе транспортной организации. Значения всех k_{ij} задаются в виде матрицы взаимосвязей задач. Трудоемкость достижения решения i -й задачи зависит от очередности разработки

$$W = W_i (I + \sum K_{ij}), \quad (17)$$

где W_i – трудоемкость i -й задачи при условии, что она выполняется независимо от остальных.

Общий случай решения задачи с переменными затратами необходимых ресурсов предусматривает последовательную разработку её элементов, и при этом выделяются две соседние. Если предположить, что это задачи с номерами i и j , то получается условие, при котором предпочтительность $i < j$, т. е. начало разработки j -й задачи, совпадает с внедрением i -й задачи. Тогда выполняется условие (16) в новом виде:

$$\left[\sum a_i (W_i + \Delta W_i + K_{ij} W_j) - K_{ij} (W_i - W_j) \right] / a_i (W_i + \Delta W_i + K_{ij} W_j) < 1, \quad (18)$$

где $\Delta W_i = W_i \sum K_{ij}$ – множество задач, предшествующих паре решений i и j .

Такое решение задачи планирования погрузочных ресурсов позволяет строить модель использования погрузочных ресурсов в новых геополитических условиях

Определить значения K_{ij} практически довольно трудно, особенно на начальных стадиях разработки плана при наличии нескольких неизвестных. Поэтому рассматривается случай, когда все $K_{ij} = K$, где K – некоторое усредненное значение, известное из опыта предыдущих разработок плана погрузки.

Если предположить, что значения a_i совпадают с величиной a_i , то условие локальной оптимальности (18) существенно упрощается, а именно для любой пары соседних задач $i < j$ рассматривается условие

$$[(n' - n_i) / (W_i - W_j)] > 0, \quad (19)$$

где n_i – количество задач, предшествующих паре i, j ; $n' = 0,5 (n - 1) / (K - 1) / 2$.

Величина n' не зависит от характеристики задач конкретной пары и задаёт следующее правило определения оптимальной очередности: если $n < n'$ и $W_i > W_j$, то $i < j$.

Полученное правило является транзитивным, если $n > n - 2$. Тогда условие (19) всегда выполняется и на множестве примеров задач I задаётся отношение порядка, определяющее оптимальную очередность разработки задач. Вопрос об этапности разработки плана в этом случае легко решается сравнением значений критерия для этапа и последовательной разработки.

Если условие транзитивности указанного условия не выполняется, то задача сводится к поиску очередности принятия решений $\sigma = \{i_1 < i_2 < \dots < i_n\}$, удовлетворяющей свойству оптимальности разработанного плана погрузки.

Для любых соседних задач i и j , связанных соотношением $i < j$, должно выполняться неравенство

$i_1 > i^1$. При таких условиях можно показать, что величина σ всегда существует при оптимизации решения задач.

Следует отметить, что основное затруднение решения данных задач планирования погрузочных ресурсов заключается в том, что их список определяется при неполной и в большинстве случаев недостоверной, часто запаздывающей информации, при наличии высокого уровня её энтропии. При этом необходимо учитывать тот факт, что характеристики возможных технических средств и наличие ресурсов на разработку и эксплуатацию транспортной системы могут оказаться ограниченными.

Методики планирования погрузочных ресурсов в новых геополитических условиях позволяют рассмотреть организацию и продвижение вагонопотоков в условиях изменения плана формирования грузовых поездов на Белорусской железной дороге в новых геополитических условиях. При этом изменяются факторы стабильности работы предприятий страны, которые используют железную дорогу. К ним отнесены: повышение уровня отправительской маршрутизации, совершенствование технологий работы сортировочных и припортовых станций, находящихся на территории иностранного государства (в России), повышается эффективность использования совместного парка подвижного состава (вагонов и локомотивов), происходит внедрение новой технологии работы и сменно-суточного планирования, контроля исполнения плана [8].

Действующая в настоящее время система организации перевозок сформировалась в конце прошлого века и была нацелена на повышение производительности подвижного состава, находящегося в единой собственности МПС СССР. С разделением общей сети по национальным образованиям произошёл раздел вагонного и локомотивного парков, передел плеч обращения вагонов и локомотивов, работы локомотивных бригад. У каждой администрации железных дорог приняты собственные стандарты по содержанию транспортных средств и железнодорожной инфраструктуры. В отдельных случаях произошла нестыковка подвижного состава при выполнении погрузки и выгрузки, крепления грузов и по другим вопросам.

Технологии перевозочного процесса были ориентированы на обязательное выполнение объемных показателей в условиях устойчивого роста грузопотоков на направлениях в среднем на 2–3 % в год. При планировании и оценке необходимых ресурсов использовалась система показателей, характеризующих количественные и качественные стороны перевозочного процесса, сохранившаяся до наших дней [9]. Эта система

нашла широкое применение в транспортной деятельности Белорусской железной дороги, что позволило сохранить устойчивость работы выполнения эксплуатационной работы.

Переход на свободный выбор направлений продвижения грузопотоков, использование приватного подвижного состава потребовал новых подходов планирования погрузочных ресурсов, основанных на использовании информационных технологий и моделирования процессов перевозки.

Практическая реализация этих направлений позволяет выполнять собственное обеспечение погрузочными ресурсами. Оно базируется на развитии инвестирования по всем параметрам перевозочного процесса: собственное производство грузовых вагонов, создание современной вагоноремонтной базы, подготовка персонала для работы в новых технологиях.

Список литературы

- 1 Шкурина, Л. В. Экономическое управление качеством транспортного производства: теория и методология : [монография] / Л. В. Шкурина, Е. А. Маскаева. – М. : PDAT, 2014. – 252 с.
- 2 Котов, А. С. Анализ организации и управления погрузкой на железных дорогах / А. С. Котов, Н. В. Сугробов // Вестник транспорта. – 2012. – № 2. – С. 17–25.
- 3 Ефремов, В. А. Логистизация управления движением поездов / В. А. Ефремов, П. В. Куренков // Логистика сегодня. – 2004. – № 5. – С. 31–38.
- 4 Филатов, И. Н. Планирование и организация перевозочного процесса на полигоне дороги / И. Н. Филатов, В. Н. Зубков, Н. Н. Мусиенко // Железнодорожный транспорт. – 2008. – № 9. – С. 24–31.
- 5 Осьминин, А. Т. Научные подходы к расчету границ полигонов управления перевозочным процессом и реализации полигонных технологий / А. Т. Осьминин // Бюллетень ОУС ОАО «РЖД», 2017. – № 2. – С. 42–56.
- 6 Кряжев, А. Н. Формирование национальной логистической инфраструктуры. Новые подходы и системные решения / А. Н. Кряжев // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2016. – Т. 10, № 10 (10). – С. 5–25.
- 7 Типовая технология управления перевозками на объединенных полигонах / В. Л. Зобнин [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 11. – С. 7–14.
- 8 Мусиенко, Н. Н. Организация и продвижение вагонопотоков в условиях изменения плана формирования грузовых поездов на Северо-Кавказской железной дороге / Н. Н. Мусиенко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2015. – № 4. – С. 69–73.
- 9 Миронов, А. Ю. Совершенствовать управление и организацию перевозок / А. Ю. Миронов // Железнодорожный транспорт. – 2007. – № 2. – С. 11–19.

Получено 15.03.2024

A. A. Mikhhalchenka. Planning railroad loading resources in new geopolitical conditions.

The results of studies on the provision of railway loading resources by type of shipment under conditions of a radical change in the direction of freight flows are presented. Unconventional methods of planning and forecasting cargo shipments were used. New ways to solve information support in the context of the functioning of information networks and artificial intelligence are considered. When solving the operational problems of planning the transportation process, taking into account new directions of cargo flows, cases are considered using non-stockable resources that cannot be accumulated for the subsequent stage of loading.

УДК 656.2.073.235

*Н. А. КЕКИШ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель;
Л. А. КЛЕШНИНА, филиал Самарского государственного университета путей сообщения, г. Нижний Новгород;
Ю. С. ЛЕОНОВА, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель; В. С. НЕМЧЕВСКИЙ,
филиал Самарского государственного университета путей сообщения, г. Нижний Новгород*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛА КОНТЕЙНЕРИЗАЦИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕВОЗОК ПРОДУКЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ОТДЕЛЬНЫХ РЕГИОНОВ

В основу исследования положены данные о структуре грузопотока промышленной продукции предприятий Нижнего Новгорода и Могилева. Целью работы является выявление и сравнение потенциала контейнеризации перевозок на основе определения контейнеропригодности продукции. Полученные результаты дают основание утверждать, что такие характеристики рассматриваемых регионов, как удаленность от морских портов и развитое экспортно-ориентированное промышленное производство контейнеропригодной продукции, создают потенциально благоприятные условия для существенного повышения уровня контейнеризации перевозок, что следует использовать для стимулирования более широкого использования этой технологии в логистических цепях с участием железнодорожного транспорта.

Введение. Контейнеризация перевозок в настоящее время относится к основным тенденциям развития мирового рынка транспортных услуг. Она играет значительную роль в транспортной отрасли и в последние годы интенсивно развивается. Контейнерные перевозки, являющиеся одним из востребованных видов перевозки, и с каждым годом объемы увеличиваются, так как это обусловлено высокой эффективностью.

Одной из главных задач является наращивание объемов международных железнодорожных контейнерных перевозок. Понимая значимость этой задачи, ОАО «РЖД» еще в 2011 году утвердило концепцию комплексного развития контейнерного бизнеса [1]. Одним из основных положений данного документа являлось признание низкого уровня контейнеризации железнодорожных перевозок и необходимость его роста.

В настоящий момент холдинг ОАО «РЖД» проводит системную работу по выходу на рынок транспортно-логистических услуг Азиатско-Тихоокеанского региона в сегменте контейнерных перевозок, а именно организации транзитных интермодальных перевозок. Одновременно планируется увеличивать объемы перевозок к 2025 г. в 1,5–2 раза по сравнению с существующими [2].

Основным направлением потенциального роста уровня контейнеризации железнодорожных перевозок является расширение номенклатуры грузов, перевозимых в контейнерах. Целью данной работы является демонстрация скрытого потенциала контейнеризации на примере двух регионов: Нижнего Новгорода (РФ) и Могилева (Республики Беларусь). Эти регионы, хотя и существенно различаются по размерам и населению, имеют общие черты в структуре промышленного производства.

Основу экономики Нижегородского региона составляют такие отрасли, как машиностроение, химия, черная металлургия, лесная, целлюлозно-бумажная, легкая, пищевая промышленность. Железнодорожные перевозки выполняются структурным подразделением ОАО «РЖД» – Горьковской железной дорогой.

На Горьковской железной дороге, управление которой расположено в Нижнем Новгороде, перевозки контейнеров выросли почти на 18 % в 2023 году.

В 2023 году в границах Горьковской железной дороги во всех видах сообщения перевезли порядка 163 тыс. груженых и порожних контейнеров ДФЭ (TEU), что на 17,8 % выше показателя прошлого года. Во внутреннем сообщении отправлено 82,2 тыс. ДФЭ (+19 %), в экспортном – 80,5 тыс. ДФЭ (+16,4 %). Количество груженых контейнеров во всех видах сообщения в 2023 году составило 95,7 тыс. ДФЭ (+12 %). Всего в контейнерах в 2023 перевезено более 1,9 млн тонн грузов (+14,7 %). Также за 2023 год Горьковская железная дорога разработала 16 новых маршрутов контейнерных поездов, а всего на станциях дороги было сформировано 540 контейнерных поездов [3]. Однако, хотя налицо положительная динамика, за 2023 год контейнерные грузы составили на Горьковской железной дороге менее 10 % от общего объема погрузки.

Для рассмотрения потенциала контейнеризации грузопотока были собраны данные о продукции основных предприятий Нижнего Новгорода различной направленности (таблица 1).

Проанализировав структурированные данные, можно сделать вывод, что грузовая база Нижегородского региона представлена существенным количеством клиентов, которые, учитывая характеристики и направления поставки изготавливаемой продукции (рисунок 1), при транспортировке могут использовать железнодорожные контейнерные перевозки. Лесные грузы, химикаты, сода, бумага, автокомпоненты, продукты питания – это основные экспортируемые виды контейнеропригодной продукции.



Рисунок 1 – География экспортных поставок из Нижнего Новгорода

Таблица 1 – Структура грузовой базы г. Нижнего Новгорода (промышленная продукция)

Предприятие	Продукция (груз)	Характеристика груза	Тара для перевозки	Направления перевозки	Контейнеро-пригодность
Завод «ГАЗ»	Легковые и грузовые автомобили, автобусы и микроавтобусы, автокомпоненты	Тарно-упаковочные (фанерные ящики) и штучные палетированные грузы	Ящик из фанеры: 1240×2220×1330	Страны Восточной Европы и СНГ, Юго-Восточной Азии, Южной Америки, Ближнего Востока и Африки	+
НМЖК	Продукты питания	Тарно-упаковочный скоропортящийся палетированный груз	–	Китай	+
АО «РУМО»	Дизельные, газодизельные и газопоршневые двигатели, поршневые компрессоры	Тарно-упаковочные и штучные грузы с габаритами, мм 940×320×790 1200×400×830	–	Китай	+
ООО «ТД Электромаш»	Базовые материалы для печатных плат, силовой аппаратуры, изделий радиоэлектроники	Тарно-упаковочные (дощатые ящики) палетированные грузы	–	Азербайджан, Вьетнам, Египет, Индия, Ирак, Иран, Йемен, Казахстан, Китай, Монголия	+
АО «Завод Красный Якорь»	Цепи, якоря, такелажные изделия	Штучные грузы (деревянные барабаны)	–	Беларусь, Казахстан	+
ВМЗ	Электросварные стальные трубы для газо- и нефтепроводов	Штучные грузы (трубы большого диаметра)	–	Ближневосточные страны и государства Юго-Восточной и Восточной Азии	–
ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез»	Продукты нефтепереработки	Наливные грузы (перевозка в цистернах)	–	Беларусь	+
АО «Волга»	Бумага	Штучные грузы (рулоны, деревянные ящики)	Ящики 160...10×240... 1200×200... 1200 мм	Китай	+
ООО «БУКА-ЕВ.РУ»	Фармацевтическая и медицинская продукция	Тарно-упаковочные палетированные грузы (ящики, коробки из гофрированного картона, металлические бочки)	–	Азербайджан, Казахстан, Монголия, Кыргызстан, Таджикистан, Туркмения и др.	+
ООО «Тосол-Синтез Трейдинг»	Промышленные химикаты	Тарно-упаковочные грузы (наливные в таре)	Бочки объемом 50–250 л, канистры 5–60 л	Италия	+
ООО ФК «Нордплит»	Фанера и аналогичные материалы из слоистой древесины	Пачки / транспортные пакеты	–	Азербайджан	+

Из общего объема рассмотренной номенклатуры продукции 91 % является пригодным для перевозки в контейнерах. Это означает, что уровень контейнеризации может быть намного выше текущих показателей.

Большая часть продукции пригодна для перевозки в универсальных контейнерах, для части номенклатурных позиций потребуется использование специализированных контейнеров (рисунок 2).



Рисунок 2 – Структура грузовой базы Нижнего Новгорода по контейнеропригодности продукции предприятий

В ходе анализа предприятий города Могилева наблюдается огромное разнообразие продукции, а также способов ее транспортировки.

Могилевская область в 2,6 раза меньше Нижегородской по площади, в 3,1 раза меньше по населению. В структуре отраслей промышленного производства ведущую роль занимают химическая и нефтехимическая (треть всего объема), легкая и пищевая промышленность, а также машиностроение и металлообработка. Так, в Могилеве функционирует крупнейший в стране завод по производству лифтов, продукция которого хорошо известна и за рубежом.

Самыми крупными предприятиями в Могилевской области являются ОАО «Могилевхимволокно», ОАО «Белшина», ОАО «Бабушкина крынка» – управляющая компания холдинга «Могилевская молочная компания», ОАО «Могилевлифтомаш».

Транспортное обслуживание в части железнодорожных перевозок выполняется Могилевским отделением Белорусской железной дороги. Общий уровень контейнеризации перевозок также не высок. Часть предприятий стабильно предпочитает пользоваться автомобильным транспортом, что может быть менее выгодно с точки зрения стоимости перевозки в международном сообщении. Если проблема таких предприятий заключается в отсутствии путей необщего пользования у предприятия, в таком случае идеальным решением послужит мультимодальная перевозка с использованием контейнеров различных типов с доставкой грузов на условиях от «двери до двери».

Анализируя продукцию предприятий города Могилева (таблица 2), можно сказать, что большая часть может перевозиться в контейнерах крытого типа, представляющих собой альтернативу крытым вагонам и крытым автотранспортным средствам. Остальная продукция может перевозиться в танк-контейнерах и флекситанках альтернативно автомобильным и железнодорожным цистернам или тарной перевозке (бочки, канистры). Продукция ОАО «Могилевский металлургический завод», а также двухосные тележки Могилевского вагоностроительного завода перевозятся в вагонах, теоретически возможна перевозка отдельных номенклатурных позиций продукции в универсальных контейнерах, специализированных контейнерах от-

крытого типа. Неконтейнеропригодной с точки зрения перевозки по железной дороге является пищевая продукция с коротким сроком хранения (молочная, мясная, хлебобулочная), которая, как правило, доставляется на небольшие расстояния (до 100 км). Нецелесообразность контейнеризации данной продукции связана с экономической неэффективностью использования железнодорожного транспорта, а не с технической невозможностью перевозки грузов такого типа в контейнерах. Поэтому для такой продукции используют фургоны-рефрижераторы, либо другие автомобили с системой поддержания и контроля температурного режима. Вагоны-хопперы, полувагоны, платформы от Могилевского вагоностроительного завода перевозятся как грузы на железнодорожном ходу. Данная номенклатурная группа является неконтейнеропригодной по техническим параметрам груза.

По данным таблицы 2 составлена диаграмма контейнеропригодности продукции предприятий города Могилева, которая позволяет наглядно оценить уровень потенциальной контейнеризации грузопотока рассматриваемого региона (рисунок 3).

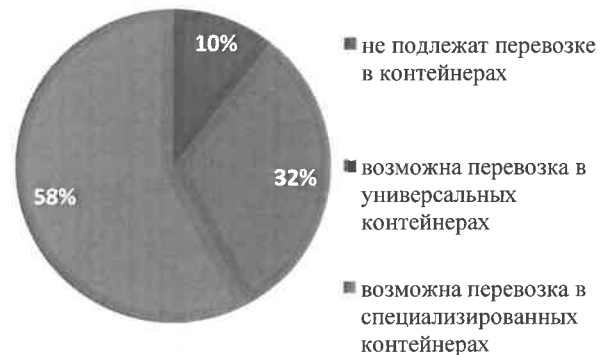


Рисунок 3 – Структура грузовой базы Могилева по контейнеропригодности продукции предприятий

На диаграмме видно, что из рассмотренных предприятий 90 % номенклатурных позиций производимой продукции являются пригодными для перевозки в контейнерах, при этом большинство номенклатурных позиций грузов могут перевозиться в универсальных контейнерах (58 %). Грузы, которые не могут перевозиться в контейнерах по причинам технической несовместимости и (или) экономической нецелесообразности составили всего 10 %.

Как и в случае с регионом Нижнего Новгорода, потенциал контейнеризации перевозок продукции предприятий Могилева как железнодорожным, так и автомобильным транспортом в мультимодальных цепях поставок намного выше, чем достигнутый в настоящее время показатель объема контейнерных перевозок. Учитывая направления поставок продукции, технология контейнерной перевозки может быть востребованной.

Таблица 2 – Структура грузовой базы г. Могилева (промышленная продукция)

Предприятие	Продукция (груз)	Характеристика груза	Тара для перевозки	Направления перевозки	Контейнеро-пригодность
ОАО «Могилевхимволокно»	ПЭТФ	Гранулы, перевозимые как тарно-упаковочный груз или насыпью	ИВС-контейнер, биг-бэг	СНГ, Восточная и Западная Европа, страны Балтии, Скандинавия, Китай, Индия, Корея	+
	Нити полиэфирные	Наполнитель полиэфирный	Блок-пакет		
	Наполнитель для мягкой игрушки, наполнитель полиэфирный	Тарно-упаковочные грузы	Кипы		
	Эфиры жирных кислот метиловые, глицерин (80 %)	Наливные грузы	–		
	Пленки термоусадочные и полимерные в рулонах	Тарно-упаковочные грузы	Коробки		
ОАО «Бабушкина крынка»	Молоко и пищевые продукты, вырабатываемые из молока	Тарно-упаковочные скоропортящиеся грузы	Коробки и ящики из гофрокартона	Республика Беларусь, РФ, Казахстан, Германия, Китай, страны Юго-Восточной Азии	+
ОАО «Могилевлифтмаш»	Лифты	Штучные грузы	Ящики	СНГ, Латвия, Грузия, Сербия, Сирийская Арабская Республика, ЮАР, Нигерия	+
ОАО «Моготекс»	Текстиль	Тарно-упаковочные грузы	Рулоны, коробки	СНГ, Грузия, Сербия, Венгрия, Латвия, Литва, Польша, Испания	+
ОАО «Могилевский мясокомбинат»	Мясные и колбасные изделия, консервы, полуфабрикаты	Тарно-упаковочные скоропортящиеся грузы	Коробки и ящики из гофрокартона	РФ, Китай, Республика Беларусь	+
ОАО «Ольса»	Мебель и спортивный инвентарь	Тарно-упаковочные грузы	Коробки	СНГ, Грузия, Азербайджан, Болгария, Монголия	+
СЗАО «Могилевский вагоностроительный завод»	Вагоны-хопперы, полувагоны, платформы, двухосные тележки	Груз на железнодорожном ходу, штучные грузы	–	РФ, страны Балтии, Восточная Азия	–
ОАО «Лента»	Текстиль	Тарно-упаковочные грузы	Рулоны, коробки	СНГ, Грузия, Литва, Латвия, Польша, Германия, США, Израиль, Венгрия	+
ОАО «Зенит»	Световая и сигнальная аппаратура	Тарно-упаковочные грузы	Коробки	СНГ	+
ОАО «МОЖЕЛИТ»	Желатин, кормовые добавки	Тарно-упаковочные грузы	Мешки, коробки	СНГ, Грузия, Болгария, Вьетнам, Турция, Япония	+
	Жир животный	Наливные грузы	–		+
ОАО Булочно-кондитерская компания «Домочай»	Хлебобулочные изделия и кондитерские изделия с коротким сроком хранения	Тарно-упаковочные грузы	Хлебные лотки, коробки	РФ, Республика Беларусь, Грузия, Израиль, США, Туркменистан, Панама	–
	Кондитерские изделия с длинным сроком хранения, газированные напитки, чай травяной	Тарно-упаковочные грузы	Коробки		+
ООО «ГазЭнерджиХим»	Сжиженные газы	Наливные грузы, перевозимые под давлением	Баллоны	За пределы ЕАЭС	+
ООО «Кронохем»	Карбамидные и фенольные смолы, формалин, КФК-85	Наливные грузы	–	ЕАЭС, Малайзия, Португалия, Словакия	+

Заключение. Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы. Для сравнения были выбраны Могилев и Нижний Новгород. Эти объекты схожи тем, что географически расположены достаточно далеко от морских портов, промышленно развиты, производят большое количество экспортно ориентированной продукции с далеко расположенными регионами сбыта, что создает предпосылки для широкого использования железнодорожного транспорта и комбинации «железнодорожный – автомобильный – морской транспорт» в мультимодальных логистических цепях. Текущий уровень контейнеризации железнодорожных перевозок в обоих регионах является сравнительно невысоким (не превышает 10 % общего объема перевозок), хотя и наблюдается тенденция к росту.

Исходя из рассмотренной структуры грузопотоков можно понять, что экспортная продукция из обоих рассматриваемых регионов отличается большим разнообразием, отсутствует одна ярко выраженная лидирующая отрасль производства с типичным грузом. Вместе с тем в целом структура грузовой базы транспорта в сравниваемых регионах достаточно существенно отличается. При этом итоговый процент потенциально контейнеризируемых номенклатурных позиций грузов составил 91 и 90 % в регионах Нижнего Новгорода и Могилева соответственно. Очень близкие по значению показатели при доточно широкой представленной в исследовании номенклатуре грузов дают основание утверждать, что в регионах с развитым экспортно ориентированным промышленным производством, предполагающим сбыт продукции с использованием длинных мультимодальных цепей поставок потенциал контейнеризации перевозок очень

высок. При соответствующем стимулировании данного процесса путем расширения парка технических средств, повышения качества транспортно-экспедиционного обслуживания при контейнерных перевозках, использования инструментов тарифной политики уровень контейнеризации железнодорожных перевозок может стать существенно выше текущих показателей. Общее повышение уровня контейнеризации позволит применять передовые технологии железнодорожных перевозок (маршрутизация, организация прямых ускоренных поездов, автоматизация выполнения терминальных операций и т. д.) и будет способствовать дальнейшему повышению качества транспортно-обслуживания грузовладельцев.

Список литературы

1 Концепция комплексного развития контейнерного бизнеса в холдинге «РЖД» : утв. ОАО «РЖД» 6 октября 2011 г. № 256 // Кодификация.РФ: действующее законодательство Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://rulaws.ru/acts/Kontseptsiya-kompleksnogo-razvitiya-konteynernogo-biznesa-v-holdinge/>. – Дата доступа : 20.04.2024.

2 Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р // Правительство России [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://gov.garant.ru/SESSION/PILOT/main.htm>. – Дата доступа : 20.04.2024.

3 Горьковская железная дорога разработала 16 новых маршрутов контейнерных поездов в 2023 году [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://gzd.rzd.ru/ru/1932/page/104069?id=290612>. – Дата доступа : 20.04.2024.

Получено 20.05.2024

N. A. Kekish, L. A. Clehnina, Yu. S. Leonova, V. S. Nemchevsky Comparative analysis of the potential for containerization of railway transportation of products of industrial enterprises in selected regions.

The study is based on data on the structure of cargo flow of industrial products of enterprises in Nizhny Novgorod and Mogilev. The purpose of the work is to identify and compare the potential of containerization of transportation based on determining the container suitability of products. The results obtained give grounds to assert that such characteristics of the regions under consideration as remoteness from seaports and developed export-oriented industrial production of container-friendly products create potentially favorable conditions for a significant increase in the level of containerization of transportation, which should be used to stimulate the wider use of this technology in logistics chains with the participation of railway transport.

УДК 625.151

П. В. КОВТУН, кандидат технических наук, О. В. ОСИПОВА, С. А. БИНДЮК, Белорусский государственный университет транспорта; В. А. МУСИЛОВИЧ, Белорусская железная дорога; М. Г. РАДУНЦЕВ, ОАО «Гомсельмаш», г. Гомель

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ЗАМЕНЫ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПУТЯХ НЕОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

Рассматриваются характерные особенности путей необщего пользования промышленных предприятий. Наличие большого количества криволинейных участков малых радиусов и стрелочных переводов позволяет иметь развитую сеть железнодорожных путей с учетом особенностей производства и стесненных условий заводской инфраструктуры. С учетом новых производственных требований рассмотрены особенности модернизации сети необщего пользования ОАО «Гомсельмаш» путем усиления стрелочного хозяйства.

Один из крупнейших производителей сельскохозяйственной техники, входящий в число лидеров мирового рынка комбайнов и других сложных сельхозмашин – ОАО «Гомсельмаш».

Для поставки сырья и отгрузки готовой продукции на предприятии эксплуатируются железнодорожные пути необщего пользования протяженностью 17,56 км. Преобладающей конструкцией в пути ОАО «Гомсельмаш» являются типы рельсов Р43 и Р50 на деревянном подрельсовом основании и песчано-гравийном или щебеночном балласте.

Характерной особенностью путей необщего пользования промышленных предприятий являются наличие большого количества криволинейных участков малых радиусов и стрелочных переводов, так как они позволяют иметь развитую сеть железнодорожных путей с учетом особенностей производства и стесненных условий заводской инфраструктуры. На путях необщего пользования ОАО «Гомсельмаш» насчитывается 50 стрелочных переводов преимущественно одиночные обыкновенные марки 1/9 с типом рельсов Р43 и Р50 на деревянном основании и щебеночном или песчано-гравийном балласте. Способ управления стрелочных переводов – ручной. Преобладающей конструкцией крестовин является сборно-рельсовая.

Сборно-рельсовые крестовины изготавливаются и собираются полностью из рельсов – сердечник состоит из двух подогнанных друг к другу рельсов по продольной острожке (зарезка на ус), соединенных между собой и с усовиками системой вкладышей и болтов (рисунок 1).



Рисунок 1 – Сборно-рельсовая крестовина

К недостаткам такой конструкции относятся большое количество деталей, тщательная подгонка, которые повышают трудоемкость изготовления. Эксплуатация сборно-рельсовых крестовин влечет за собой повышение затрат по подтяжке крепежных элементов для обеспечения целостности конструкции и их безопасной эксплуатации.

Кроме того, на путях необщего пользования постройки до 1970 г. при отсутствии реконструкции до сих пор может эксплуатироваться колея 1524 мм. При этом данная информация не всегда отображается в технической и бухгалтерской документации.

Как известно, ширина рельсовой колеи S_0 непосредственно влияет на характер вписывания подвижного состава в переводную кривую. Основные геометрические размеры стрелочного перевода связаны двумя расчетными уравнениями (рисунок 2):

$$R(\sin\alpha - \sin\beta_n) + k\cos\alpha = L_T; \quad (1)$$

$$R(\cos\beta_n - \cos\alpha) + k\sin\alpha = S_0, \quad (2)$$

где R – радиус переводной кривой, мм; α – угол крестовины, град; β_n – начальный угол остряка, град; k – прямая вставка перед математическим центром крестовины, мм; L_T – теоретическая длина стрелочного перевода, мм; S_0 – ширина рельсовой колеи в крестовине, мм.

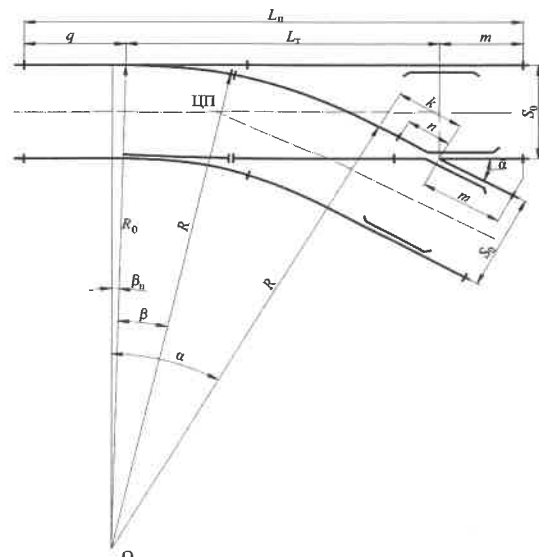


Рисунок 2 – Схема стрелочного перевода

То есть, при одних и тех же параметрах стрелочный перевод более широкой колеи будет иметь и больший радиус переходной кривой. Вследствие этого облегчается вписывание тележки в кривую. Следует подчеркнуть, что согласно СТП [4] допуск на содержание середины переходной кривой (как одного из наиболее расстраиваемых мест по шаблону) составляет +10 мм. Это максимальный допуск по ширине рельсовой колеи в пути. Таким образом, при увеличении S_0 длина стрелочного перевода может приниматься меньшей.

При производстве работ по паспортизации путей необщего пользования ОАО «Гомсельмаш» было установлено, что длины эксплуатируемых стрелочных переводов при одной и той же марке отличаются на величины до 4 м, в том числе и по причине разной номинальной ширины рельсовой колеи.

В условиях конкурентного преимущества в настоящее время наблюдается рост новых потребителей продукции ОАО «Гомсельмаш». Это влечет за собой определенные изменения в логистике технологических операций: подача сырья и комплектующих, складирование и отгрузка готовой продукции и т.д. Поэтому в

связи с меняющимися условиями производства существующее путевое развитие не в полной мере соответствует потребностям предприятия. Отдельные элементы верхнего строения требуют замены и усиления. В частности, при производстве работ по модернизации путевого развития рассматривается возможность замены стрелочных переводов типа Р43 на тип Р50. С учетом сроков службы подстрелочного основания также проработана возможность укладки отдельных стрелочных переводов на железобетонных брусках.

Подлежащие замене стрелочные переводы типа Р43 расположены на разных участках путей необщего пользования предприятия. В результате анализа путевого хозяйства для решения поставленной задачи в зависимости от расположения и взаимной увязки стрелочных переводов целесообразно разделить все железнодорожные пути предприятия на районы по логистике переустройства. По результатам инженерно-геодезической съемки были выделены 11 участков переустройства путевого развития, которые представлены на схеме путей необщего пользования ОАО «Гомсельмаш» (рисунок 3).

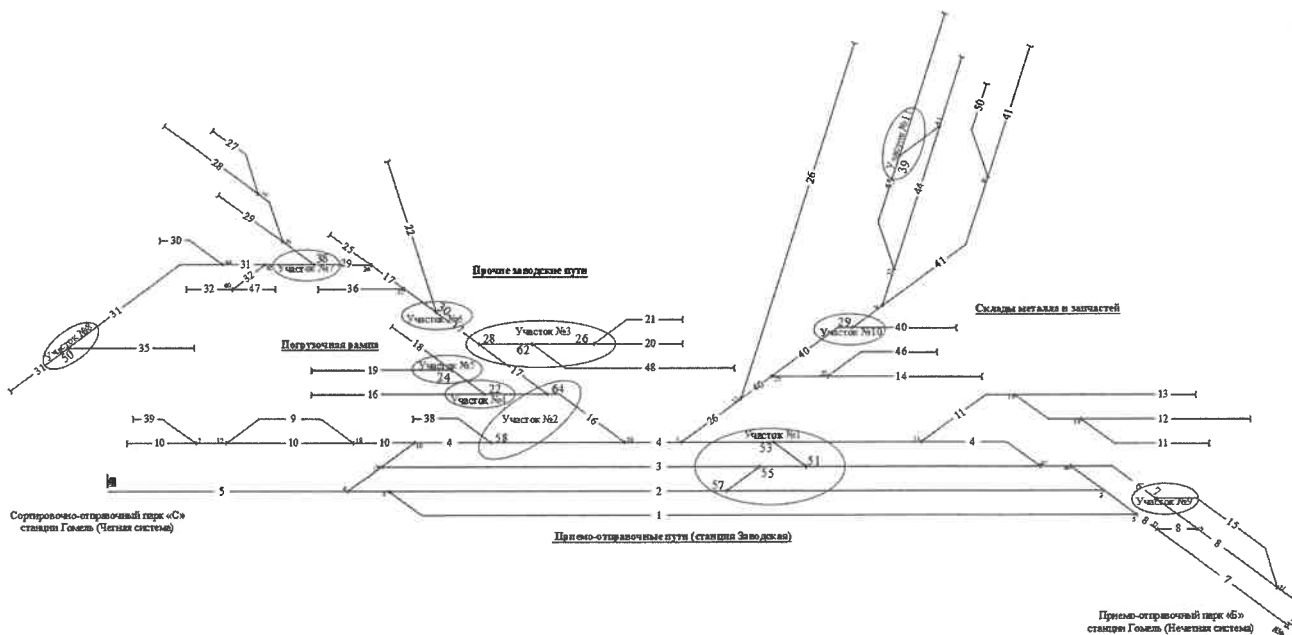


Рисунок 3 – Схема железнодорожных путей ОАО «Гомсельмаш»

Для выполнения поставленной задачи был построен план каждого из рассматриваемых участков. Разработка вариантов переустройства производилась с использованием графического редактора AutoCAD.

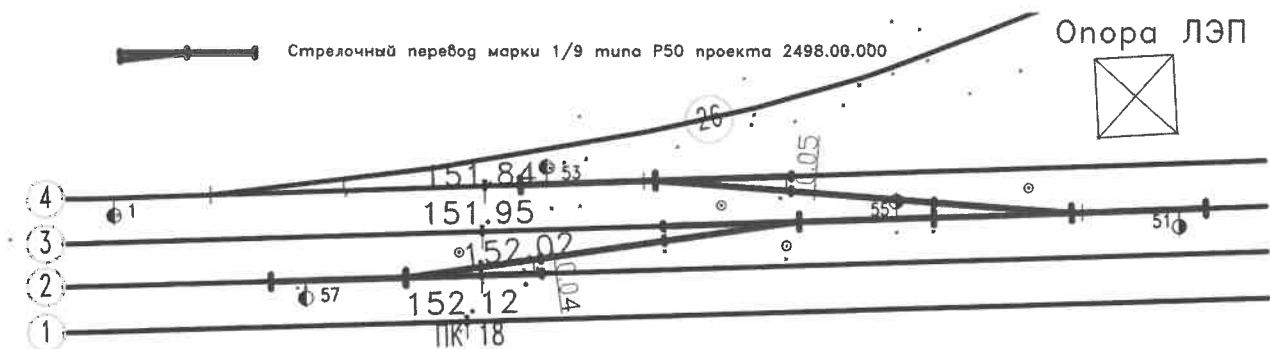
Так как все заменяемые стрелочные переводы являются одиночными обыкновенными, но имеют различную полную длину, то при разработке рекомендаций по модернизации путевого развития целесообразно рассматривать возможность укладки разных стрелочных переводов длиной, наиболее близкой к длине заменяемых. Таковыми конструкциями являются одиночные обыкновенные стрелочные переводы марки 1/9 типа Р50 на деревянных брусках Муромского стрелочного завода проектов 2498.00.000 и ЛПТП.665121.105. Данные переводы различаются длиной (соответственно 31,057 м и 26,039 м), шириной рельсовой колеи (соот-

ветственно 1520 мм и 1524 мм), назначением (соответственно для магистральных путей и путей промышленных предприятий) и особенностями конструкции. Для продления срока службы подстрелочного основания целесообразно также рассмотреть возможность укладки стрелочных переводов на железобетонном основании. Однако с железобетонными брусками изготавливаются стрелочные переводы более тяжелого типа Р65, например, марки 1/9 проекта 2769.00.000 Муромского стрелочного завода длиной 31,035 м.

Наиболее грузонапряженным является участок путевого развития № 1, где эксплуатируются подлежащие замене одиночные обыкновенные стрелочные переводы № 51 и № 53, а также № 55 и № 57. Указанные стрелочные переводы образуют два нормальных съезда между путями № 3 и № 4 и № 3 и № 2 соответ-

ственно, поэтому их переукладку необходимо рассматривать поэтапно, но в комплексе. В первую очередь подлежит замене одиночный обыкновенный правосторонний стрелочный перевод № 53 типа Р43 марки 1/9, расположенный на пути № 4 и имеющий полную длину 29,00 м. С целью минимизации сдвижек прилегающих путей данный стрелочный перевод целесообразно заменить на одиночный обыкновенный правосторонний стрелочный перевод типа Р50 марки 1/9 колеи 1520 мм проекта 2498.00.000 Муромского стрелочного завода с полной длиной 31,057 м с привязкой по задним стыкам крестовины. Для этого задний стык нового стрелочного перевода № 53* остается на ПК1835,20. Передний стык стрелочного перевода № 53* сдвигается относительно существующего против хода пикетажа на пикет

ПК1804,14. При этом рихтовка пути № 4 не требуется (рисунок 4). Далее подлежит замене одиночный обыкновенный правосторонний стрелочный перевод № 51 типа Р43 марки 1/9, расположенный на пути № 3 с полной длиной 28,80 м. Так как он образует съезд с предыдущим стрелочным переводом, то целесообразно выполнить его замену аналогично первому случаю. То есть задний стык нового стрелочного перевода № 51* остается на ПК1851,80, а передний стык стрелочного перевода № 51* сдвигается относительно существующего по ходу пикетажа на пикет ПК1882,86. При этом рихтовка пути № 3 не требуется, а максимальная рихтовка прямой вставки на съезде СП № 51*– СП № 53* составляет 0,05 м. Таким образом, будет заменен съезд СП № 51–СП № 53 (см. рисунок 4).



Наименование точек	ПКРР СП N57*	ПК СП N55	ЗСК СП N57	ПКРР СП N53	ЗСК СП N53*	ПК СП N1	ЗСК СП N55	ПК СП N51	ПК СП N57	ЗСК СП N53*	ОО СП N55	ПКРР СП N55*	ЗСК СП N51*	ПК СП N53	ОО СП N51	ПКРР СП N51*
Проектируемые расстояния от переднего стыка рамного рельса стрелочного перевода N°205	1775,91		1804,14	1806,97		1820,74		1835,20		1851,80		1862,86				
Расстояния от переднего стыка рамного рельса стрелочного перевода N°205	1778,95	1797,40	1804,95	1806,20	1807,15	1807,55	1820,70	1827,40	1834,95	1835,20	1847,50	1851,80	1863,15	1879,75	1880,60	
Наименование точек	ПКРР СП N57	ПК СП N55	ЗСК СП N57	ПКРР СП N53	ЗСК СП N53*	ПК СП N1	ЗСК СП N55	ПК СП N51	ПК СП N57	ЗСК СП N53*	ОО СП N55	ПКРР СП N55*	ЗСК СП N51*	ПК СП N53	ОО СП N51	ПКРР СП N51*

Рисунок 4 – Схема переустройства путевого развития участка № 1 с укладкой стрелочных переводов марки 1/9 типа Р50 проекта 2498.00.000 на деревянных брусках

Следующим подлежит замене одиночный обыкновенный левосторонний стрелочный перевод № 55 типа Р43 марки 1/9, расположенный на пути № 3 и имеющий полную длину 31,06 м. Так как длина совпадает с длиной проекта 2498.00.000, новый стрелочный перевод № 55* укладывается на те же ординаты и стыкуется передним стыком рамного рельса с задним стыком по прямому пути стрелочного перевода № 51* на ПК1851,80. Задний стык стрелочного перевода № 55* будет располагаться на ПК1820,74. При этом рихтовка прилегающего пути № 3 не требуется.

В завершении подлежит замене одиночный обыкновенный левосторонний стрелочный перевод № 57 типа Р43, расположенный на пути № 2 и имеющий полную длину 26,10 м. Данный стрелочный перевод можно заменить на аналогичный по длине стрелочный

перевод проекта ЛПТП.665121.105. Но так как он образует съезд с переводом № 55*, то целесообразно в съезде применение одинаковых стрелочных переводов, т. е. одиночного обыкновенного левостороннего стрелочного перевода типа Р50 марки 1/9 колеи 1520 мм проекта 2498.00.000 Муромского стрелочного завода (полная длина 31,057 м) с привязкой по задним стыкам крестовины. При этом задний стык нового стрелочного перевода № 57* остается на ПК1804,95. Передний стык стрелочного перевода № 57* сдвигается относительно существующего положения против хода пикетажа на пикет ПК1774,89. При этом рихтовка пути № 2 не требуется, однако появляется значительная рихтовка величиной 0,26 м на съезде, что влечет появление углов или S-образных кривых на соединительной вставке. С целью минимизации сдвижек прилегающих

путей данный новый стрелочный перевод № 57* необходимо уложить в съезд под углом, равным углу крестовины. Для этого необходимо выполнить расчет съезда. Расчет ведется по следующим формулам согласно рисунку 5:

$$l_1 = E \operatorname{ctg} \alpha; \quad (3)$$

$$l = E / \sin \alpha, \quad (4)$$

где l_1 – теоретическая длина съезда, м; l – длина съезда, м; E – ширина междупутья, м; α – угол крестовины стрелочного перевода.

Полная длина съезда рассчитывается по формуле

$$L_n = 2a + l_1, \quad (5)$$

где a – расстояние от переднего стыка рамного рельса до центра перевода.

Величина прямой вставки определяется по формуле

$$d = E / \sin \alpha - 2b, \quad (6)$$

где b – расстояние от центра перевода до заднего стыка стрелочного перевода (хвост крестовины).

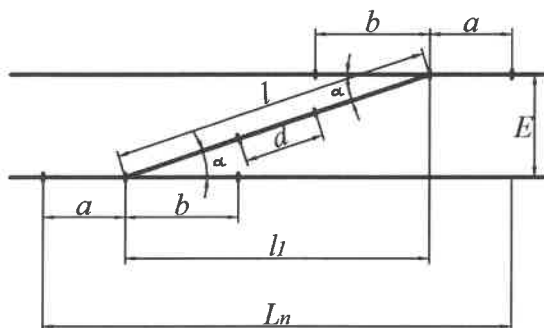


Рисунок 5 – Схема расчета обыкновенного съезда

Основные размеры новых стрелочных переводов № 55* и № 57*:

$$\alpha = 6^\circ 20' 25''; a = 15,455 \text{ м}; b = 15,602 \text{ м}.$$

Ширина междупутья $E = 5,025$ м.

Таким образом,

$$l_1 = 5,025 \operatorname{ctg} 6^\circ 20' 25'' = 45,22 \text{ м};$$

$$l = 5,025 / \sin 6^\circ 20' 25'' = 45,50 \text{ м};$$

$$L_n = 2 \cdot 15,455 + 45,22 = 76,13 \text{ м};$$

$$d = 5,025 / \sin 6^\circ 20' 25'' - 2 \cdot 15,602 = 14,30 \text{ м}.$$

Привязка нового съезда ведется по передним стыкам стрелочного перевода № 55*, расположенным на пикете ПК1851,80. Тогда передние стыки стрелочного перевода № 57* будут находиться на пикете ПК1851,80-76,13=ПК1775,67 по пути № 3. С учетом разбежки пикетажа по пути № 2 передний стык стрелочного перевода № 57* будет сдвигаться относительно существующего положения против хода пикетажа на пикет ПК1775,91. Задний стык нового стрелочного перевода № 57* сдвигается относительно существующего положения по ходу пикетажа на ПК1806,97. При этом рихтовка пути № 2 не требуется, а максимальная сдвижка прямой вставки на съезде СП № 55*–СП № 57* составляет 0,04 м. Схема переустройства участка пути № 1 представлена на рисунке 4.

С целью увеличения срока службы подстрелочного основания была проработана возможность укладки новых стрелочных переводов № 51*, № 53*, № 55*, № 57* на железобетонных брусках типа Р65 марки 1/9 проекта 2769.00.000 Муромского стрелочного завода

с полной длиной 31,035 м. Переустройство выполняется аналогично рассмотренному выше, только с учетом разницы в длинах новых стрелочных переводов на 0,022 м.

Как видно из представленного материала, модернизация участка № 1 возможна с укладкой новых стрелочных переводов выбранных трех проектов без существенного изменения путевого развития, так как рассматриваемый участок прямолинейный и нет близко расположенной заводской инфраструктуры. Далее по аналогии проработаны варианты замены всех остальных стрелочных переводов типа Р43, эксплуатируемых на других выделенных участках (№ 2–№ 11). Однако на территории завода переустройство зачастую усложнялось стесненными условиями существующей застройки, наличием большого числа криволинейных участков малых радиусов и расположением насаждений. Если к стрелочным переводам примыкают криволинейные участки, то их замена на более длинные конструкции приводит к необходимости переустройства прилегающих кривых зачастую с уменьшением радиусов. Поэтому примыкающие кривые радиусами менее 200 м не затрагивались. Они являются барьерными местами при изменении путевого развития. Наилучшее вписывание подвижного состава и соответственно минимизация износных явлений реализуется на прямых участках или пологих кривых и поэтому при модернизации необходимо стремиться к спрямлению плана линии. Однако в некоторых случаях приходится выбирать между вариантом с прямым путем, но переносом существующей заводской инфраструктуры (пешеходного перехода) и вариантом с сохранением места положения инфраструктуры (пешеходного перехода), но с устройством S-образных кривых. А в некоторых случаях изменения обязательны, например, для реализации замены стрелочного перевода № 62 необходим обязательный перенос переводного механизма СП № 26 из междупутья на противоположную сторону (рисунок 6). Также при замене стрелочных переводов на более длинные с целью сохранения полезной длины пути для выполнения маневровой работы появляется необходимость удлинения данных железнодорожных путей и т. д.

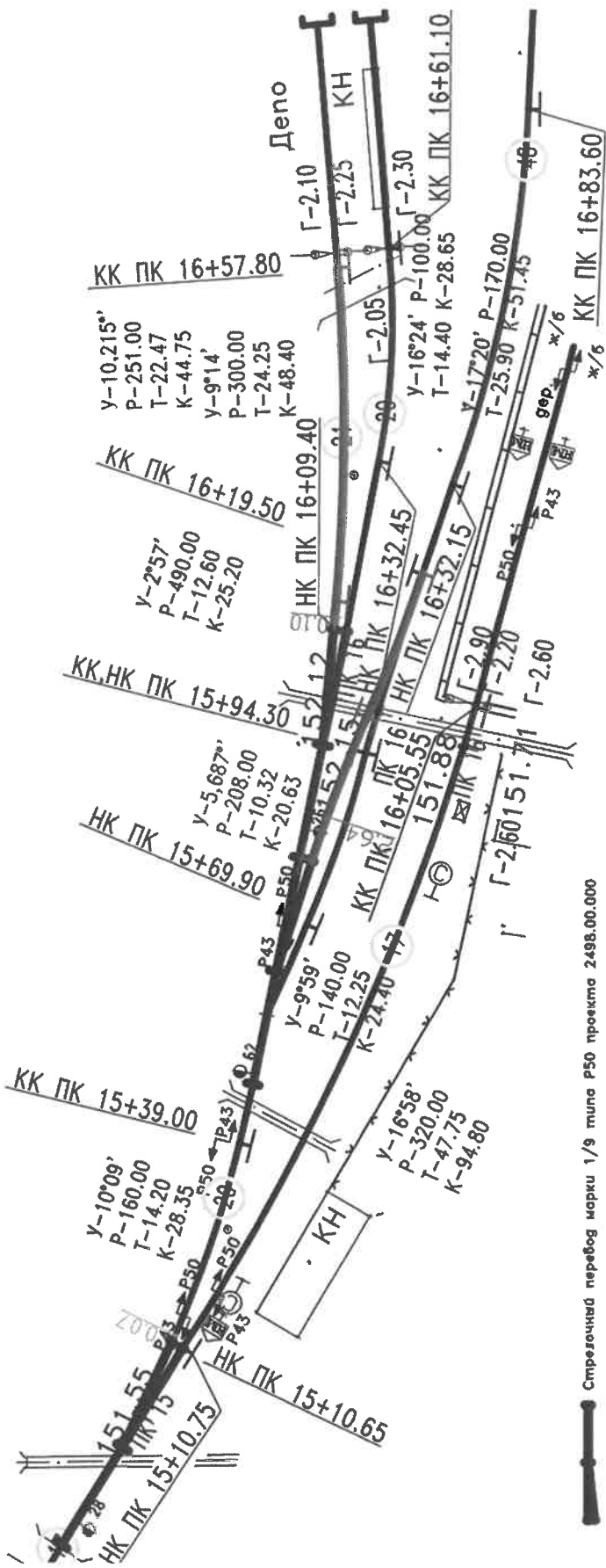
В результате разработки мероприятий по модернизации путей необщего пользования ОАО «Гомсельмаш» можно сделать следующие выводы.

1 С учетом конъюнктуры рынка замена стрелочных переводов типа Р43 на тип Р50 марки 1/9 возможна только на деревянных брусках. Наиболее подходящим проектом с железобетонными брусками является стрелочный перевод с рельсами типа Р65.

2 Замена всех 17 стрелочных переводов на более мощный тип возможна, и в каждом конкретном случае есть альтернативные варианты на усмотрение заказчика в зависимости от величины рихтовки, длины стрелочного перевода, его мощности т. д.

3 Замена стрелочного перевода № 62 предполагает перенос переводного механизма стрелочного перевода № 26 из междупутья на противоположную сторону.

4 Существующие кривые радиусом менее 200 м не подлежат переустройству.



Наименование точек	Прокладочные расстояния от переднего ступа рамного рельса стрелочного перебега №205	Расстояние от переднего ступа рамного рельса стрелочного перебега №205	Наименование точек
1479.69	1482.60	1485.40	00 СП N28
1475.00	1479.69	1482.60	ПСРП СП N28
1510.75	1510.75	1510.75	ЗСК СП N28
1528.10	1528.10	1528.10	ПС СП N28
1543.70	1543.70	1543.70	ДСР неупрощенного
1544.40	1544.40	1544.40	ПСРП СП N62
1547.28	1547.28	1547.28	ПСРП СП N62*
1578.45	1578.45	1578.45	ЗСК СП N62
1581.25	1581.25	1581.25	ПСРП СП N26
1582.10	1582.10	1582.10	00 СП N26
1599.30	1599.30	1599.30	ДСР неупрощенного
1598.97	1598.97	1598.97	КК
1609.40	1609.40	1609.40	ЗСК СП N26
1613.05	1613.05	1613.05	НК
1619.60	1619.60	1619.60	КК
1630.00	1630.00	1630.00	ПС СП N26
1659.50	1659.50	1659.50	ДСР неупрощенного
1659.50	1659.50	1659.50	ДСР неупрощенного
1661.10	1661.10	1661.10	Ворота
1657.80	1657.80	1657.80	КК

Рисунок 6 — Схема переустройства путевого развития участка № 3 с укладкой стрелочных переводов марки 1/9 типа Р50 проекта 2498.00.000 на деревянных брусьях

Список литературы

1 СНБ 3.03.01–98. Железные дороги колеи 1520 мм. – Минск : М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь, 1998. – 26 с.

2 ТКП 45–3.03–163–2009. Железные дороги. Земляное полотно. Правила проектирования. – Минск : М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь, 2010. – 99 с.

3 Каталог продукции Муромского стрелочного завода. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.oaomsz.ru/wp-content/uploads/2023/04/kat_prod.pdf. – Дата доступа : 8.11.2023.

4 СТП-09150.56.010–2005. Текущее содержание железнодорожного пути. Технические требования и организация работ : утв. приказом нач. Бел. ж. д. от 29.06.2006 № 221Н. – Минск, 2006. – 283 с.

5 Совершенствование путевого развития ОАО «Борисовский шпалопропиточный завод» / О. Н. Власенко [и др.] // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт, 2021. – № 2 (43). – С. 37–39.

6 Ковтун, П. В. Особенности проектирования подъездных путей в стесненных условиях / П. В. Ковтун, О. В. Осипова, Д. А. Сапроненко // Проблемы безопасности на транспорте : материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. ; под общ. ред. В. И. Сенько. – Гомель : БелГУТ, 2015. – С. 251.

7 Особенности строительства и эксплуатации железнодорожных путей необщего пользования в стесненных условиях / П. В. Ковтун [и др.] // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2023. – № 2 (47). – С. 38–42.

Получено 11.03.2024

P. V. Kovtun, O. V. Osipova, S. A. Binduk, V. A. Musilovich, M. G. Radunzev. Current issues of replacing turnout switches on non-public railway tracks.

A characteristic feature of non-public paths of industrial enterprises is the presence of a large number of curved sections of small radii and turnout switches. They make it possible to have a developed network of railway tracks, taking into account the specifics of production and the cramped conditions of the factory infrastructure. Taking into account new production requirements, the features of modernizing the non-public railway tracks of OJSC Gomselmash by strengthening the switch facilities were considered.

УДК 625.151

П. В. КОВТУН, кандидат технических наук, О. В. ОСИПОВА, С. А. БИНДЮК, Белорусский государственный университет транспорта; Н. Н. КРАВЧЕНКО, В. А. МУСИЛОВИЧ, Белорусская железная дорога, г. Гомель

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ ВЕДЕНИЯ ПУТЕВОГО ХОЗЯЙСТВА

Рассмотрены особенности систем ведения путевого хозяйства в странах СНГ, Европы, Соединенных Штатах Америки. Представлены перспективы развития путевого хозяйства Белорусской железной дороги с учетом механизации выполнения путеремонтных работ и современных структурно-организационных форм содержания пути.

Путевое хозяйство является одним из наиболее важных хозяйств на Белорусской железной дороге. От его технического состояния в значительной степени зависят пропускная способность железнодорожных участков, безопасность движения поездов и оперативность предоставления услуг. На долю путевого хозяйства приходится более четверти стоимости основных фондов Белорусской железной дороги, шестая часть эксплуатационных расходов, в нем занята шестая часть работников железнодорожного транспорта. Путевое хозяйство Белорусской железной дороги – это 11729,9 км развернутой длины железнодорожных путей, из которых 7231,7 км – главные, 3621,2 км – станционные и 876,8 км – необщего пользования, более 12 тысяч стрелочных переводов, 1744 железнодорожных переездов, 4426 искусственных сооружений. Содержание путевого хозяйства и его ремонт обеспечивают 29 предприятий, в том числе 20 дистанций пути, 6 дистанций защитных лесонасаждений, государственные предприятия «Ремпуть Белорусской железной дороги», «Центр механизации путевых работ Белорусской железной дороги», УП-РСП-10, в которых трудятся более 11 тысяч работников. Повышение надежности железнодорожного пути является основой обеспечения безопасности движения поездов, повышения скоростей движения поездов при одновременном снижении эксплуатационных затрат. Поэтому во всех развитых странах мира надежности железнодорожного пути уделяется исключительное внимание.

Одна из самых оптимальных систем организации путевого хозяйства.

Система ведения путевого хозяйства Германии считается одной из самых современных и эффективных в мире. Помимо нескольких региональных веток все железные дороги в Германии принадлежат частной компании «Немецкие железные дороги» (Deutsche Bahn, или DB), которая контролирует подвижной состав из 29000 поездов, обслуживает 5500 станций и 35000 км путей. Немецкие поезда развивают на некоторых участках пути скорость до 330 км/ч, что делает их одними из самых быстрых в мире.

На железных дорогах Германии в первую очередь внимание уделяется не скорости выполнения и объемам путевых работ, а высокому уровню качества ремонта и текущего содержания пути. Эта задача актуальна и для Белорусской железной дороги, тем более в 2024 году, объявленном годом качества.

Фундаментальные требования в экономическом расчете на весь срок службы конструкции пути формули-

руются достаточно просто: устойчивость, безопасность и сохранение геометрических параметров в течение длительного времени. Важность этих показателей побудила Государственные железные дороги Германии (DBAG) к разработкам вариантов конструкции пути, которые отвечают высоким требованиям обеспечения безопасности движения поездов. Одним из вариантов является железнодорожный путь на плитном основании. Первый экспериментальный участок такого пути был уложен еще в 1972 году на станции Реда. Состояние пути здесь хорошее и в настоящее время. За 50 лет по этому участку прошло более 1000 млн т брутто и, кроме шлифовки рельсов, никакого другого обслуживания не потребовалось. Максимальная скорость установлена 200 км/ч. Путь сохранил не только устойчивость, но и плавность движения.

Монолитная путевая система имеет высокую работоспособность. Убедительные аргументы в ее пользу – это долговечность, скорость, комфортность и высокая способность к восприятию нагрузок [1]. И спустя много лет практически не обслуживаемая монолитная, безбалластная путевая система гарантирует почти стопроцентную эксплуатационную готовность. Зачастую необслуживаемый путь – более выгодное решение на долгосрочную перспективу.

Монолитная путевая система длительно обеспечивает стабильное положение колеи и стойку, с высокой надежностью, качеством и функциональностью выдерживает большие нагрузки на высокоскоростных магистралях. Точная (до миллиметра) юстировка верхнего строения при монтаже непосредственно на месте – главный фактор высокой комфортности езды и меньшей нагрузки на подвижной состав.

Благодаря минимальному сроку службы в 60 лет, необслуживаемому исполнению или низким расходам на ремонт и обслуживание монолитная путевая система обеспечивает высокую эксплуатационную готовность и беспрецедентную экономическую эффективность для высокоскоростного транспорта.

Благодаря сравнительно небольшой высоте конструкции и возможности добиться оптимального проектного положения колеи, несмотря на неровности в нижнем строении, монолитная путевая система зарекомендовала себя как универсальная системная модель для путей и стрелочных переходов, годная к применению на земляном полотне, на мостах и в тоннелях [1].

На примере Berliner Nordbahn, в которой применяется безбалластная путевая технология и установленные скорости свыше 200 км/ч, видно, что система те-

кущего содержания пути в Германии на высочайшем уровне. На обслуживание эксплуатационной длины 1000 километров пути и 2000 стрелочных переводов задействовано всего 100 человек, из них:

- 6 человек – инженеры по контролю за состоянием пути;

- 57 мастеров, контролирующих работу подрядных фирм;

- 37 рабочих, устраняющих мелкие неисправности.

Качество пути определяется сохранением его геометрических характеристик в течение длительного периода времени, от чего зависят работоспособность системы «колесо – рельс» и эффективность использования инфраструктуры.

Инновационный подход к содержанию пути на железных дорогах Соединенных Штатов Америки Railroad Company.

Для обеспечения надежности пути и безопасного движения поездов на всех железных дорогах США важнейшим фактором является своевременная диагностика и постоянный контроль с возможностью своевременного отслеживания изменений, происходящих как в верхнем строении пути, так и в земляном полотне.

Традиционные методы контроля состояния пути, основанные на визуальных осмотрах, все чаще дополняются или заменяются автоматическим контролем с использованием самоходных специализированных вагонов, включаемых в состав поезда или на комбинированном железнодорожном автомобильном ходу. Такие вагоны оснащены оборудованием для измерения основных параметров пути и требуют присутствия квалифицированного персонала для проведения измерений и оценки полученных данных.

Всё активнее используются и становятся ключевым элементом управления состоянием пути и обеспечения безопасности движения поездов автономные системы контроля. На всех железных дорогах первого класса США они в немалой степени способствуют уменьшению числа случаев схода с рельсов. Однако для пропуска путеизмерительных вагонов нужно выделять нитки графика или время для занятия пути, что также требует привлечения соответствующего обслуживающего персонала и сравнительно больших затрат в течение срока службы таких вагонов.

На железных дорогах США разрабатываются технологии, которые могут способствовать повышению безопасности движения, в частности, исследовательская программа по продвижению разработок и использованию автономных путеизмерительных систем (Autonomous Track Geometry Measurement System, ATGMS). Программа охватывает четыре основные задачи:

- снижение затрат на измерение геометрии пути в расчете на весь срок службы системы;

- исключение влияния на движение графиковых поездов;

- увеличение частоты и эффективности обследований;

- обеспечение высокого качества информации для планирования работ по текущему содержанию пути и управлению безопасностью движения.

Концепция FRA (федеральная железнодорожная администрация США) сводится к созданию сравнительно недорогой путеизмерительной системы с автономным источником питания, которую можно устанавливать на обычные вагоны, как грузовые, так и пассажирские. Перемещаясь в составе графикового поезда, такая система должна собирать и передавать точные данные о геометрии пути. Целью является создание более гибкого и эффективного инструмента для текущего контроля состояния пути и планирования его текущего содержания, дополняющего традиционные ручные и автоматизированные методы контроля.

Опыт эксплуатации железнодорожного пути на железных дорогах ОАО «РЖД».

На железных дорогах Российской Федерации дистанция пути является основным подразделением по содержанию пути, поэтому на нее возлагается проведение надзора за состоянием пути и сооружений, выполнение неотложных и первоочередных работ по текущему содержанию.

ОАО «РЖД» в целях повышения важнейших эксплуатационных и технико-экономических показателей железнодорожных участков и направлений, а также повышения капитализации компании выпустило распоряжение «Об утверждении Положения об организации комплексного обслуживания объектов инфраструктуры хозяйства пути и сооружений» [2]. Оно является нормативно-техническим документом, регламентирующим общие принципы, организацию текущего содержания железнодорожного пути и сооружений, технические параметры, нормативы и требования по реконструкции железнодорожного пути, которые включают критерии назначения реконструкции, подготовку проектов с проведением обследовательских и изыскательских работ, организацию выполнения работ, приемку и сдачу в эксплуатацию пути после его реконструкции и др.

Положение применяется при планировании, организации и проведении реконструкции участков, требующих усиления железнодорожного пути при изменении условий его эксплуатации, а также при необходимости повышения эксплуатационных и таких технико-экономических показателей линий, как обеспечение требуемых пропускной и провозной способности, увеличение продолжительности жизненного цикла верхнего строения пути, снижение трудоемкости и стоимости технического обслуживания пути и др.

Основным структурным подразделением дистанции пути является эксплуатационный участок под руководством начальника участка (ПЧУ). При наличии крупных станций для их обслуживания в зависимости от местных условий сохранены линейные отделения или созданы специализированные бригады [2].

На однопутных линиях длина участка составляет в зависимости от состояния пути и местных условий (в частности, числа малых станций) 50–60 км, на двухпутных она увеличивается до 100–120 км развернутой длины главных путей. В зону обслуживания ПЧУ входит, как правило, не более одной участковой или грузовой станции. При наличии сортировочных, пассажирских и

крупных грузовых станций организуется отдельный эксплуатационный участок.

Длина зоны обслуживания бригады по неотложным работам и бригадира по проверке пути на однопутном участке 35–45 км, на двухпутном – 60–75 км и не более трех промежуточных станций [2].

В зимний период в зависимости от климатических условий укрупненные бригады направляются на снегоборьбу или на их основе организуются дополнительные бригады по неотложным работам.

После образования региональных управлений по содержанию пути или укрупненных дистанций пути участковые бригады по планово-предупредительным работам упраздняются, кроме бригад, обслуживающих станции. Из них формируются региональные колонны по планово-предупредительным работам на текущем содержании пути. На участках вместо них создаются бригады по 10–12 чел. для выполнения крупных по объему первоочередных работ. При этом указанные работы могут производиться совместно с бригадами для неотложных работ.

Перегонный участок в зависимости от местных условий укомплектован путеремонтной летучкой, мотовозом с крановой установкой и кабиной для доставки бригад, а на два участка должна выделяться пассажирская автомотриса и грузопассажирская дрезина, оборудованная крановой установкой со сменными рабочими органами для работ по земляному полотну и балласту. За крупными станциями закрепляется мотовоз с краном и автолетучка.

Внедрение новых подходов по организации текущего содержания железнодорожного пути на Белорусской железной дороге.

Дистанция пути является линейным структурным подразделением путевого хозяйства, основной функцией которой является текущее содержание железнодорожного пути.

Главной задачей текущего содержания железнодорожного пути является содержание его в пределах установленных норм и допусков, обеспечение длительных сроков службы всех элементов пути (земляного полотна, верхнего строения, искусственных сооружений и путевых устройств), предупреждение появления неисправностей, своевременное их устранение и ликвидация причин, которые вызывают неисправности железнодорожного пути и сооружений, безопасное и плавное движение поездов с установленными скоростями.

Текущее содержание осуществляется непрерывно в течение всего года и на всём протяжении железнодорожного пути, включая и участки, где производится тот или иной вид периодического ремонта.

На дистанцию пути возлагается:

- надзор и контроль состояния железнодорожного пути и сооружений;
- выполнение неотложных, первоочередных и планово-предупредительных работ по текущему содержанию железнодорожного пути и земляного полотна с учетом времени года и местных условий (водоборьба, снегоборьба), включая текущее содержание лотков, канав, кюветов;

- улучшение состояния промышленной безопасности;
- улучшение охраны труда;
- поддержание санитарно-экологического состояния полосы отвода.

Планирование работ на околотке осуществляется ежемесячно. План-график составляется дорожным мастером совместно с начальником участка на основании комплексной оценки по данным весеннего (осеннего) комиссионного осмотра пути, периодических осмотров пути, стрелочных переводов, искусственных сооружений, земляного полотна и путевых устройств с учетом данных диагностических средств, использования необходимой путевой техники и механизмов, материалов верхнего строения пути.

Для выполнения этих задач на Белорусской железной дороге используются современные высокопроизводительные машины, представленные на рисунках 1–3.



Рисунок 1 – Dynamik Express-09-3X



Рисунок 2 – ВПР-09



Рисунок 3 – Dynamik Express-09-3X

В составе *плановых работ* предусматриваются следующие виды работ:

- выправка пути в плане и профиле (подбивка шпал и рихтовка пути в сезон летних путевых работ, укладка прокладок в зимний период);
- регулировка стыковых зазоров;
- перешивка и регулировка ширины рельсовой колеи;
- одиночная смена рельсов, скреплений и шпал;
- разрядка кустов негодных шпал и переводных брусьев;
- содержание балластной призмы и земляного полотна (водоотводных сооружений, откосов земляного полотна);
- планировка балластной призмы (при необходимости с досыпкой балласта) и обочин земляного полотна;
- подготовка пути к осенне-зимнему периоду и пропуску весенних вод;
- разрядка температурных напряжений в рельсовых плетях;
- очистка рельсов и скреплений от грязи, добивка костылей и поправка противогононов на звеньевом пути с деревянными шпалами;
- удаление загрязнений из-под подошвы рельсов и засорителей с поверхности балластной призмы;
- смазка и закрепление стыковых болтов, клеммных и закладных болтов;
- снего- и водоборьба;
- выполнение работ, сопутствующих выправке пути с применением комплексов путевых машин;
- устранение недостатков в содержании электрических рельсовых цепей;
- размагничивание рельсовых цепей;
- другие виды работ текущего содержания пути.

В составе *неотложных работ* предусматриваются следующие работы:

- замена остродефектных рельсов и элементов стрелочных переводов;
- устранение отступлений в содержании рельсовой колеи, требующих ограничения установленной скорости движения или его закрытия;
- устранение расстройств железнодорожного пути, требующих ограничения скоростей движения или его закрытия, таких как излом накладок, срез и выпадение болтов из болтовых отверстий, излом рельсов, загромождение пути развалившимся грузом, падение деревьев, деформация ферм металлических пролетных строений, размыв земляного полотна и (или) балластного слоя, выброс пути, выход из реборд подошвы рельса на 3 шпалах или брусьев подряд, вертикальные и горизонтальные ступеньки и разрыв рельсовых стыков более величины, соответствующей установленными скоростями, резкие просадки, углы в плане, боковые и вертикальные толчки и т. п.;
- устранение неисправностей, выявленных в ходе проведения комиссионных месячных осмотров станций.

В составе работ путевых бригад предусматриваются следующие виды деятельности:

- неотложные, первоочередные и плановые работы под руководством бригадира пути в зависимости от вида работ в соответствии с требованиями СТП БЧ

56.232–2012 «Безопасность движения поездов при производстве путевых работ», утвержденного приказом заместителя Начальника Белорусской железной дороги от 06.11.2023 № 1098НЗ. При необходимости к выполнению работ привлекаются работники из других путевых бригад

- основной функцией путевой бригады является своевременное выполнение работ по текущему содержанию пути;
- дорожный мастер ежедневно согласовывает с начальником участка план работы и докладывает об объеме выполненных работ путевыми бригадами;
- после устранения неисправностей, повлекших ограничение скорости движения поездов и (или) закрытие пути для движения, качество и полноту выполненных работ путевыми бригадами проверяет заместитель начальника дистанции пути;
- журнал планирования и учета выполнения работ по текущему содержанию пути и сооружений и оценки их состояния (форма ПУ-74), в котором отражаются работы, выполняемые всеми бригадами, ведет дорожный мастер;
- порядок доставки путевых бригад и путевых контролеров к месту работ и обратно определяется Регламентом обслуживания эксплуатационного участка.

За путевым контролером *закрепляются следующие функции:*

- осмотр всех путей и стрелочных переводов (включая станции), в том числе переводных механизмов и стрелочной арматуры, желобов, с проверкой колеи по шаблону и уровню, искусственных сооружений, земляного полотна и путевых устройств;
- сопровождение дефектоскопных и путеизмерительных тележек (по графику, при необходимости дополнительного контроля);
- измерение стыковых зазоров на звеньевом пути и подвижек рельсовых плетей относительно «маячных» шпал на бесстыковом пути;
- участие в весеннем и осеннем комиссионных осмотрах пути;
- устранение выявленных при осмотре неисправностей, которые не требуют при выполнении работ участие более чем одного человека.

Путевой контроллер осуществляет контроль:

- за устранением неисправностей и качеством выполненных работ при текущем содержании пути;
- качеством замены дефектных и остродефектных рельсов;
- качеством устранения неисправностей 2–5-й степеней, выявленных вагонами-путеизмерителями и диагностическим комплексом инфраструктуры 2–4-й степеней путеизмерительными тележками;
- качеством устранения замечаний, выявленных в ходе комиссионных осмотров станций и путей необходимого пользования.

Планирование работы путевого контролера осуществляется ежемесячно в соответствии с графиком осмотра пути и сооружений, составляемым на основании установленной периодичности проверки пути, который разрабатывается не позднее 25-го числа, предшествующего планируемому месяцу.

Разработка графика возлагается на начальника участка. График согласовывается с заместителем дистанции пути и утверждается начальником дистанции пути. В графике должен отражаться ежедневный фронт осмотра: перегон, путь, километр, пикет, станция, номер пути, номер стрелочного перевода и т. д.

При составлении графика необходимо особое внимание уделять осмотру участков с просроченными нормативными сроками выполнения восстановительного ремонта пути, участкам, имеющим наибольший износ элементов верхнего строения пути, неустойчивыми и деформирующимися участкам земляного полотна. Выписка из графика передается для исполнения путевому контролеру.

Путевой контролер ежедневно докладывает начальнику участка о выполнении утвержденного графика осмотра. Ежедневные неисправности вносятся в справку по осмотру с указанием конкретного места расположения (перегон, станция, путь, километр, пикет и т. д.) и ранжированием неисправностей на неотложные, первоочередные и плановые. Справка составляется в двух экземплярах, один из которых выдается для организации устранения неисправностей дорожному мастеру, второй экземпляр находится у начальника участка. Ежедневный контроль за путевым контролером возлагается на начальника участка.

Организация системы текущего содержания пути, стрелочных переводов, искусственных сооружений,

земляного полотна и путевых устройств для конкретного эксплуатационного участка определяется регламентом обслуживания эксплуатационного участка.

Регламент разрабатывается дистанцией пути для каждого эксплуатационного участка с учетом местных особенностей.

Список литературы

1 Путевые машины [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.rempm.ru/production/travelingcars/mashinyidlya-vosstanovleniya-profilya-golovki-rels/>. – Дата доступа : 11.12.2023.

2 Положение об организации комплексного обслуживания объектов инфраструктуры хозяйства пути и сооружений ОАО «РЖД»: утв. распоряжением от 29.11.2019 № 2675/р. – 169 с.

3 Капранов, Д. О. Реформирование системы текущего содержания железнодорожного пути / Д. О. Капранов // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2016. – № 1 (32). – С. 281–282.

4 Гриб, В. М. Современные подходы к развитию путевого хозяйства / В. М. Гриб, Н. В. Мамсиков, А. А. Альховская // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2018. – № 2. – С. 37–39.

5 Дубровская, Т. А. Анализ состояния и перспективы развития путевого хозяйства Белорусской железной дороги / Т. А. Дубровская, А. В. Цариков // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2021. – № 2 (43). – С. 29–33.

6 Ковтун П. В. Развитие путевого хозяйства Белорусской железной дороги на современном этапе / П. В. Ковтун, Т. А. Дубровская // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2022. – № 1 (44). – С. 73–75.

Получено 11.03.2024

P. V. Kovtun, O. V. Osipova, S. A. Bindiuk, N. N. Kravchenko, V. A. Musilovich. Prospects for the development of the system for implementing track facilities.

The features of the systems for introducing track facilities in the CIS countries, Europe, and the United States of America are considered. Prospects for the development of track facilities of the Belarusian Railway are presented, taking into account the mechanization of track installation work and modern structural and organizational forms of track maintenance.

УДК 656.021.5

Ан. В. СУГОРОВСКИЙ, канд. техн. наук, С. Н. КОЛ, доцент, Российский университет транспорта (МИИТ));
А. В. СУГОРОВСКИЙ, канд. техн. наук, АО «Институт экономики и развития транспорта» (АО «ИЭРТ»);
Н. Д. КРУТИКОВ, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
Российская Федерация

ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПОЕЗДОВ

Рассмотрен существующий опыт внедрения автоматизированных систем управления на железнодорожном транспорте, проанализирована их эффективность при повышении безопасности движения и точности движения поездов. Изучено текущее состояние и перспективы развития автоматизированного управления движением поездов. Предложены рекомендации для дальнейших исследований и внедрения новых технологий на железнодорожном транспорте.

В настоящее время на железных дорогах мира уделяется особое внимание автоматизации управления движением поездов при соблюдении безопасности и надежности перевозки и увеличении скорости движения [1, 2]. Разрабатываются и внедряются проекты по совершенствованию пассажирских перевозок при интенсификации движения за счет сокращения интервала движения между поездами, что становится возможным благодаря применению интеллектуальных технологий, в том числе использованию искусственного интеллекта [3–7].

В концепции технологического развития Российской Федерации на период до 2030 г., утвержденной распоряжением правительства от 20 мая 2023 года, наряду с инновационными мегапроектами технологического развития прямо обозначена задача внедрения беспилотных технологий [8].

Проект «Беспилотники для пассажиров и грузов», в рамках которого предусмотрена модернизация, создание инфраструктуры и центров управления движением беспилотными транспортными средствами для всех видов транспорта, в том числе и железнодорожного, является одним из ключевых проектов и реализуется в рамках стратегического направления в области цифровой трансформации транспортной отрасли Российской Федерации до 2030 года [9]. Ведется разработка технологических и организационных мероприятий по созданию грузовой и пассажирской логистики с применением беспилотников, а также нормативно-правового регулирования управлением беспилотными транспортными средствами на уровне государства.

Развитию беспилотного вождения поездов уделено большое внимание в Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. Ставятся вопросы совершенствования законодательства, создания нормативно-правовой базы, которая бы позволила осуществлять эксплуатацию и регулировать беспилотное вождение поездов на уровне международных организаций и законодательства Российской Федерации.

В рамках направления цифровой трансформации транспортной отрасли выделена задача создания и внедрения автономного движения (без помощника машиниста, без машиниста с удаленным контролем, полностью автономное движение), предусматриваю-

щая, за счет минимизации влияния человеческого фактора, повышение уровня безопасности пассажирских перевозок, снижение себестоимости, повышение удовлетворенности пассажиров, а также развитие и повышение пропускной способности инфраструктуры железных дорог [10].

На сегодня ОАО «Российские железные дороги» является флагманом в сфере развития беспилотных технологий. В Стратегии научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 г. и на перспективу до 2030 г. (Белая книга) к классу автоматизированных решений, обладающему высоким технологическим потенциалом, отнесены малолюдные и безлюдные технологии, позволяющие свести к минимуму влияние человеческого фактора, за счет автоматизации процесса управления движением поездов, включая беспилотный режим вождения [11].

Утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» от 6 сентября 2023 года Комплексная программа инновационного развития холдинга «РЖД» на период до 2025 в рамках группы инновационных проектов «Автоматическое управление подвижным составом» раскрывает следующие направления развития: разработка и внедрение технических средств для подвижного состава, включая «машинное зрение», средства управления и программное обеспечение; проектирование и создание «умной» инфраструктуры, обеспечивающей обмен данными с подвижным составом [12].

Идея развития беспилотного вождения поездов зародилась еще в XX веке. В СССР с 1960-х годов проходили испытания автономного ведения поездов в метрополитене с применением комплексной системы автоматического управления. В те же годы в Японии была разработана система автоведения АТОМІС со 2-м уровнем автоматизации, которая обеспечивала контроль и корректировку скорости поезда. На метрополитене Франции в 1983 году одна из линий Лилля была оборудована Автоматической системой VAL, предусматривающей отсутствие персонала в кабине машиниста. В Великобритании с 1993 года на железнодорожной линии Mail Rail курсировал полностью беспилотный поезд между почтовыми отделениями, линия была проложена под землей, с 1927 года было осуществлено управление движением поездов диспетчерами, при этом управленец должен был находиться на каждой станции линии [13].

Системы полностью беспилотного движения были разработаны давно, однако они не получили широкого развития по нескольким причинам. Так, в XX веке о безопасности беспилотного вождения речи не шло. Например, на линии Mail Rail в Великобритании поезд ехал вследствие изменения величины напряжения на контактном рельсе диспетчером, то есть, по сути, как радиоуправляемая игрушка, и остановиться перед спонтанно возникшим препятствием он не мог. Сейчас к системам автоматизированного движения применяют высокие требования безопасности, предусматривающие распознавание даже ручных сигналов, подаваемых человеком на путях.

Рассмотрим внедрение беспилотных технологий в мире с учетом достигнутых уровней автоматизации в трех сферах железнодорожного транспорта: метрополитен, пригородное сообщение, маневровое движение.

Согласно национальному стандарту в области систем управления и контроля движения железнодорожного транспорта в сфере пригородного движения [14], введенного в действие в 2022 году, разработанного с учетом положений международного стандарта управления городским железнодорожным транспортом и систем регулирования и контроля МЭК 62290:2014 (IEC 62290 (2014)), принято пять уровней автоматизации (УА) вождения поездов. В международной классификации GoA (Grade of Automation). УА-0 (GoA0) – ручной режим, автоматизация отсутствует; УА-1 (GoA1) – автоматизированный режим, поезд находится под полным управлением машиниста, при этом система контролирует состояние машиниста, соблюдение ограничений скорости, а также исключает проезд запрещающего показания и осуществляет срабатывание экстренного торможения, в случае проезда запрещающего показания светофора; УА-2 (GoA2) – автоматизированный режим, система осуществляет управление тяговым подвижным составом, автоматизированы запуск и остановка поезда, система обрабатывает сведения и выдает результаты предварительной оценки о работе оборудования, машинист несет ответственность за принятие окончательного решения; УА-3 (GoA3) – автоматический режим, система полностью автоматизирована, но в кабине поезда должен находиться машинист, который вмешивается в управление в случае возникновения чрезвычайных ситуаций, при этом система распознаёт поданные сигналы для остановки поезда и даже реагирует на внезапно возникающие препятствия, обеспечивая задействование систем торможения для избежания столкновения; УА-4 (GoA4) – автоматический режим, система полностью автоматизирована, в кабине отсутствует локомотивная бригада, при этом реализована возможность удаленного контроля работы оборудования и приборов. На этом уровне автоматизации машинист-оператор в случае возникновения чрезвычайных и требующих вмешательства нештатных нестандартных ситуаций дистанционно осуществляет управление тяговым подвижным составом.

Анализ развития технологии в 20 странах, которые в той или иной степени достигли высоких уровней автоматизации при внедрении беспилотного движения

на железнодорожном транспорте, показал, что Россия занимает лидирующие позиции в области разработки, исследования, тестирования и введения в эксплуатацию беспилотных поездов. К 2023 году во всех трех сферах железнодорожного транспорта были проведены успешные испытания автоматизированных поездов: движение в полностью беспилотном режиме электропоезда ЭС2Г «Ласточка» по МЦК (Московское центральное кольцо), тестирование полностью беспилотного маневрового локомотива ТЭМ7А на станции «Лужская», а также эксплуатация его на уровне GoA3, тестирование в режиме GoA4 поездов в метрополитене [15]. В Москве планируется внедрение в Московскую монорельсовую транспортную систему полностью беспилотных поездов, что снизит затраты на персонал при эксплуатации [16].

Объединенные Арабские Эмираты в феврале 2021 года открыли полностью автоматизированное движение по Dubai Route 2020 протяженностью 15 км с 7 станциями [17]. В Китае между городами Чжэнчжоу и Сюйчан проходят испытания пригородных поездов в максимальном режиме автоматизации. А в декабре 2021 года была введена в коммерческую эксплуатацию линия Шанхайского метрополитена с полностью беспилотным режимом движения [18]. В Ухане 04.10.23. была введена в эксплуатацию беспилотная монорельсовая линия с уровнем автоматизации GoA3 [19]. В Индии в августе 2021 года была введена в эксплуатацию полностью автоматизированная линия метрополитена в Дели [20]. В 2023 году в Стамбуле (Турция) открылась линия метрополитена с максимальной автоматизацией, способная перевозить 44 400 пассажиров в час в каждом направлении с интервалом попутного следования 90 секунд [21]. Во Франции на линию Парижского метрополитена в сентябре 2022 года были запущены полностью автоматизированные поезда [22]. В Великобритании с марта 2018 года запущен в движение между городами Питерборо и Хоршем беспилотный пассажирский поезд [23]. В Финляндии в районе Войккаа испытывается беспилотный маневровый локомотив с максимальным уровнем автоматизации, ожидается, что он будет использоваться на промышленных площадках и грузовых портах [24]. В США в Гонолулу запущена система метро Skyline с полностью автоматизированной линией [25]. В Канаде введена в эксплуатацию первая очередь линии автоматизированного облегченного метро REM в Большом Монреале. Участок первой очереди длиной 17 км с пятью станциями соединяет муниципалитет Броссар в пригороде Монреаля с центральным вокзалом Монреаля. Уровень автоматизации поездов –GoA4 [26]. В Италии в начале 2022 года начали оборудовать 1 линию городского метрополитена средствами, позволяющими использовать полностью беспилотные поезда [27]. В Сиднее (Австралия) в 2021 году началась полномасштабная модернизация пригородной железнодорожной линии Bankstown line, которая должна заработать в 2024 году в полностью беспилотном режиме [28]. В Венском метрополитене (Австрия) на реализуемой линии U5 будет производиться эксплуатация поездов в полностью автоматизированном режиме [29]. В Каире (Египет) с 2021 года производится строительство пол-

ностью автоматизированной монорельсовой железной дороги [30]. В ноябре 2022 года начато проектирование первой в Африке беспилотной линии метро [31]. В Нидерландах с 2022 года осуществляют тестирование пригородного сообщения в дистанционном режиме автоведения поезда между станцией Гронинген и сортировочными станциями Де-Форк и Нет-Трейнз [32]. В декабре 2022 года в городе Бреда прошли успешные испытания беспилотного маневрового локомотива с уровнем автоматизации GoA4 [33]. В метро города Гаосюн в Тайване с октября 2022 года проходят испытания полностью беспилотных поездов [34]. В Японии внедряют технологию автоведения со степенью автоматизации GoA2, позволяющую управлять поездом на высокоскоростной линии Токайдо-синкансэн (планируется к 2028 г.) [35]. На

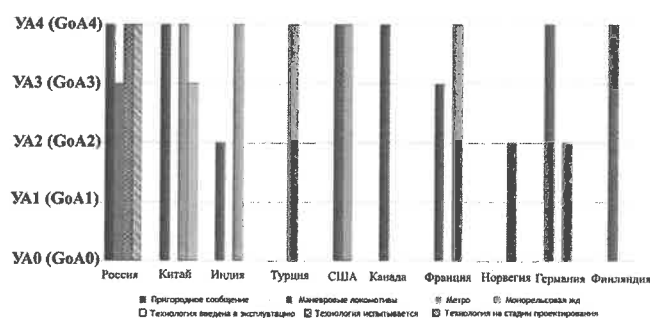


Рисунок 1 – Уровень автоматизации движения поездов первой десятки стран

Данное исследование включает только беспилотное движение пассажирских поездов. Беспилотное грузовое движение развивается пока только в двух странах: в Австралии (на линии горнодобывающей руды Rio Tinto) [39] и в Нидерландах (на линии Betuwe) [40]. В Австралии впервые столкнулись с проблемами при эксплуатации полностью автоматизированного поезда – он сошел с рельсов, компания никак не комментирует данный инцидент.

Из представленного выше анализа следует, что во всём мире первыми вводятся в эксплуатацию поезда в метрополитене. Это вызвано следующими факторами: во-первых, метрополитен в большинстве случаев является закрытым пространством, что снижает риск возникновения на путях «спонтанных» препятствий для поезда, например, человек, животное, автомобиль и так далее; во-вторых, в метрополитене отсутствует влияние погодных условий, что значительно упрощает работу искусственного интеллекта; в-третьих, метрополитен имеет значительно меньшее путевое развитие станции, в основном, это один единственный путь, а соответственно, поезд постоянно движется по одному и тому же маршруту, что снижает вероятность ошибки при движении по вариантному маршруту.

Указанные отличия в сложности эксплуатации поездов в метрополитене и на наземном транспорте успешно решаются инженерами. Так, маневровый локомотив в силу своих передвижений исключительно на станции по огромному количеству разных маневровых передвижений и работе рядом с людьми дополнительно оснащается большим количеством камер и ульт-

ра звуковых датчиков как спереди и сзади, так и по бокам для обеспечения безопасности и исключения наезда на сотрудников железной дороги, работающих в непосредственной близости с локомотивом, таких как составители, осматривщики вагонов, сигналисты а также иной персонал.

В целом российские автоматизированные поезда готовы к полномасштабной эксплуатации, но возникает ряд причин, по которым их не вводят на пути общего пользования.

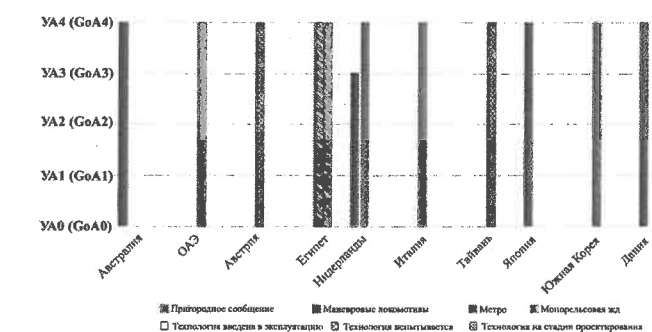


Рисунок 2 – Уровень автоматизации движения поездов второй десятки стран

Первой причиной является недостаточная подготовка к эксплуатации таких поездов в области правового регулирования [41]. В правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации в редакции 2022 года внесены изменения касательно беспилотного движения, при этом регламентировано только использование автоматизированных поездов на путях необщего пользования, на путях общего пользования эксплуатация беспилотников запрещена [42].

Вторая причина – по ряду оценок отсутствие экономической целесообразности использования беспилотных поездов в метро.

Третья причина обусловлена недоверием к беспилотным технологиям обычных граждан, которые не готовы ехать в поезде, в котором нет машиниста за рулем.

Четвертая причина – повышение точности определения местоположения поезда. На данный момент имеются проблемы с системой LTE, так как для ведения поезда на уровне автоматизации GoA4 требуется передача данных на скорости 8 Мбит/с. Раньше такую пропускную спо-

способность данных обеспечивала компания Huawei, но в настоящий момент компания ушла, что создало проблему [43].

Однако тестирование автоматизированных поездов, их модернизация продолжается полным ходом. Весной 2023 года было произведено испытание электропоезда «Ласточка» в беспилотном режиме движения в общем транспортном потоке на МЦК, испытание прошло успешно. Ежедневно в тестовом режиме работает беспилотный маневровый локомотив ТЭМ7А с уровнем автоматизации GoA4 на железнодорожной станции Лужская, выполняя задачи по маневровым перемещениям составов. Тестирование беспилотных «Ласточек» проходит также на специально созданном цифровом двойнике МЦК с отработкой различных нештатных ситуаций [44].

На МЦК 10 августа 2023 года прошла демонстрационная поездка двух поездов «Ласточка» с бортовыми номерами ЭС2Г № 113 и № 136 в общем потоке движения пассажирских поездов [45]. Во время данной поездки беспилотные поезда следовали за обычными пассажирскими поездами, на маршрут следования (специально, по сценарию) был выпущен человек – электропоезд остановленные поезда совершали остановки на всех станциях МЦК, при этом двери для посадки пассажиров не открывали. Поезда следовали с уровнем автоматизации GoA3 (в кабине находился помощник машиниста). Также было протестировано дистанционное управление машинистом из ЦДКУ (Центр дистанционного контроля управления). На этой демонстрационной поездке машинист наблюдал из ЦДКУ за двумя автоматизированными поездами сразу. При проведении испытаний весной машинист также управлял двумя поездами одновременно. Данные испытания при созданных условиях были осуществлены Российскими железными дорогами впервые в мире. Запуск беспилотного движения поездов на МЦК намечен на лето 2024 года, при этом в кабине будет находиться оператор.

Правовая база в области регулирования беспилотного железнодорожного движения постепенно модернизируется, в ближайшем будущем планируют ввести поправки в приказ Минтранса России № 97 от 08.07.2008 «Об утверждении положения о порядке служебного расследования и учета транспортных происшествий, повлекших причинение вреда жизни или здоровья граждан, не связанных с производством на железнодорожном транспорте», эти поправки должны будут включать в себя регламентирование использования поездов в дистанционном режиме.

Развитие пассажирских перевозок является одним из приоритетных направлений ОАО «РЖД». Внедрение беспилотных «Ласточек» на МЦК повысит не только безопасность движения на кольце и уменьшит рутинную работу персонала железной дороги, но и будет иметь положительный экономический эффект. В настоящее время на МЦК интервал движения в час пик составляет 4 минуты [47]. Внедрение беспилотных поездов позволит сократить интервал движения на кольце до 2–3 минут. Практика показала, что при уменьшении времени тактового движения возрастает пассажиропоток. Так, при уменьшении интервала так-

тового движения в Санкт-Петербурге с Витебского вокзала на Павловск до 10 минут пассажиропоток вырос на 16 % к уровню 2022 года. При введении тактового движения между Балтийским вокзалом и Ораниенбаумом пассажиропоток вырос на 13 % по сравнению с показателем 2022 года и на 28 % по сравнению с 2021 годом [48]. После сокращения интервала следования поездов на МЦК, по оценкам аналитиков, следует ожидать увеличения пассажиропотока на 10–15 %.

Список литературы

- 1 Сугоровский, А. В. Тренды в автоматизации управления локомотивами (в России и в мире) / А. В. Сугоровский, М. Д. Хабаров // III Бетанкуровский международный инженерный форум : сб. тр., Санкт-Петербург, 02–03 декабря 2021 года. – Т. 2. – СПб. : ПГУПС, 2021. – С. 153–156.
- 2 Хабаров, М. Д. Когнитивный анализ автоматизации управления локомотивами в различных странах мира / М. Д. Хабаров, А. В. Сугоровский // Техник транспорта: образование и практика. – 2021. – Т. 2, № 4. – С. 411–417.
- 3 Сугоровский, А. В. Типовой имитационный пассажирский модуль для комплексного исследования железнодорожных направлений, узлов и станций / А. В. Сугоровский, А. В. Сугоровский // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9, № 2. – С. 57–65.
- 4 Сугоровский, А. В. Анализ безопасности перевозок на различных видах транспорта / А. В. Сугоровский, А. Ю. Кайгородова // Железнодорожный транспорт. – 2022. – № 1. – С. 74–77.
- 5 Крутиков, Н. Д. Правовое обеспечение беспилотных поездов на железных дорогах Российской Федерации / Н. Д. Крутиков, И. В. Ефимов, А. В. Сугоровский // Транспорт и логистика: Развитие в условиях глобальных изменений потоков : сб. науч. тр. VII Междунар. науч.-практ. конф., Ростов-на-Дону, 01–02 февраля 2023 года. – Ростов н/Д : РГУПС, 2023. – С. 176–179.
- 6 Сугоровский, А. В. Типовой имитационный пассажирский модуль для комплексного исследования железнодорожных направлений, узлов и станций / А. В. Сугоровский, А. В. Сугоровский // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9, № 2. – С. 57–65.
- 7 Sugorovsky, A. V. Determination of the Simulation Method of Technical Equipment and Technological Support for Non-public Tracks / A. V. Sugorovsky // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia. – 2021, Novosibirsk, 11–14.05. 2021. – Vol. 402-1.
- 8 Концепция технологического развития на период до 2030 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 20 мая 2023 г. – № 1315-р.
- 9 Стратегическое направление в области цифровой трансформации транспортной отрасли Российской Федерации до 2030 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 21 декабря 2021 г. – № 3744-р.
- 10 Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : утв. распоряжением Правительства от 27 ноября 2021 г. – № 3363-р.
- 11 Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга) : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 17.04.2018 г. – № 769/р.
- 12 Комплексная программа инновационного развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 06.09.2023 г. – № 2274/р.
- 13 Охотников, А. Л. Мировые тенденции развития систем автоматического управления движением поездов / А. Л. Охотников, И. А. Волкова // Наука и технологии железных дорог. – 2023. – № 2. – С. 24–29.
- 14 ГОСТ Р 70059-2022. Национальный стандарт Российской Федерации. Системы управления и контроля железно-

- дорожного транспорта для перевозок пассажиров в пригородном сообщении. Принципы построения и основные функциональные требования : утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 05.04.2022 № 192-ст.
- 15 Когда у России появятся свои поезда на автопилоте [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://plus-one.ru/society/2022/03/09/poezda-na-avtopilote>. – Дата доступа : 04.10.2023.
- 16 Московский монорельс решили сделать беспилотным [Электронный ресурс] // Информационное агентство «РБК» . – Режим доступа : <https://www.rbc.ru/rbcfreenews/6527b94d9a79477cfad941cf>. – Дата доступа : 14.10.2023.
- 17 Дубай: новая линия метро к выставочному центру [Электронный ресурс] // Железные дороги мира. – Режим доступа : <https://zdmira.com/news/dubai-novaya-liniya-metro-k-vystavochnomu-tsentru>. – Дата доступа : 04.10.2023.
- 18 На востоке Китая планируют ввести в эксплуатацию первый беспилотный пригородный поезд [Электронный ресурс] // Информационное агентство «РЖД–Партнер.РУ». – Режим доступа : <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news/navostokeykitaya-planiruyut-vvesti-v-ekspluatatsiyu-pervyyu-bespilotnyu-priгородnyu-poezd/>. – Дата доступа : 04.10.2023.
- 19 В Китае запущена первая в стране подвесная монорельсовая дорога с беспилотными поездами CRRC [Электронный ресурс] // Информационное агентство ROLLINGSTOCK Agency. – Режим доступа : <https://rollingstockworld.ru/grt/v-kitae-zapushhena-pervaya-v-strane-podvesnaya-monorelsovaya-doroga-s-bespilotnymi-poezdami-crrc/>. – Дата доступа : 04.10.2023.
- 20 На линии 7 метрополитена Дели пустили беспилотные поезда / [Электронный ресурс] // Железные дороги мира. – Режим доступа : <https://zdmira.com/news/na-linii-7-metropolitena-deli-pustili-bespilotnye-poezda>. – Дата доступа : 04.10.2023.
- 21 В Стамбуле открылась автоматизированная линия метро М8 [Электронный ресурс] // Железные дороги мира. – Режим доступа : <https://zdmira.com/news/v-stambule-otkrylas-avtomatizirovan-naya-liniya-metro-m8yu>. – Дата доступа : 04.10.2023.
- 22 Линия 4 парижского метро станет беспилотной [Электронный ресурс] // International Railway Journal. – Режим доступа : <https://www.railjournal.com/passenger/metros/paris-metro-line-4-goes-driverless/>. – Дата доступа : 04.10.2023.
- 23 В Великобритании компания Thameslink Railway запустила первый беспилотный пассажирский поезд [Электронный ресурс] – Режим доступа : <https://www.gudok.ru/news/?ID=1408824>. – Дата доступа : 28.10.2023.
- 24 Автономный маневровый локомотив проходит испытания / [Электронный ресурс] // Railway Gazette International. – Режим доступа : <https://www.railwaygazette.com/traction-and-rolling-stock/autonomous-shunting-locomotive-on-test/61883.article>. – Дата доступа : 04.10.2023.
- 25 Метро Skyline в Гонолулу: первая полностью автономная система метро в Соединенных Штатах [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.railtechnologymagazine.com/articles/honolulu-skyline-metro-first-fully-autonomous-metro-system-united-states>. – Дата доступа : 04.10.2023.
- 26 В Монреале открыли движение по первому участку автоматизированного метро [Электронный ресурс] // Железные дороги мира. – Режим доступа : <https://zdmira.com/news/v-monreale-otkryli-dvizhenie-po-pervomu-uchastku-avtomatizirovanogo-metro>. – Дата доступа : 04.10.2023.
- 27 Alstom поставит новую систему сигнализации и дополнительные поезда для линии 1 Туринского метрополитена [Электронный ресурс] // Alstom SA. – Режим доступа : <https://www.alstom.com/press-releases-news/2022/2/alstom-supply-new-signalling-system-and-additional-trains-line-1-turin>. – Дата доступа : 04.10.2023.
- 28 Сидней заключает новый контракт на модернизацию линии Бэнкстаун [Электронный ресурс] // Railway Pro. – Режим доступа : <https://www.railwaypro.com/wp/sydney-awards-a-new-contract-for-bankstown-line-upgrade/>. – Дата доступа : 04.10.2023.
- 29 Новое метро для Вены – type X от Siemens Mobility-metro начинает обслуживать пассажиров [Электронный ресурс] // Siemens Global Website. – Режим доступа : <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/new-metro-vien-na-siemens-mobilitys-type-x-metro-starts-passenger-service>. – Дата доступа : 04.10.2023.
- 30 Alstom успешно доставила первые два монорельсовых поезда Innovia 300 для Каирской монорельсовой дороги в срок [Электронный ресурс] // Alstom SA. – Режим доступа : <https://www.alstom.com/press-releases-news/2021/9/alstom-successfully-delivers-first-two-innovia-300-monorail-trains-cairo>. – Дата доступа : 04.10.2023.
- 31 Alstom подписала рамочное соглашение с Национальным управлением туннелей для проектирования и строительства линии 6 Каирского метрополитена [Электронный ресурс] // Alstom SA. – Режим доступа : <https://www.alstom.com/press-releases-news/2022/11/alstom-signed-framework-agreement-national-authority-tunnels-design-and-construction-cairo-metro-line-6>. – Дата доступа : 28.10.2023.
- 32 В Нидерландах испытают систему автоведения поездов с дистанционным управлением [Электронный ресурс] // Железные дороги мира. – Режим доступа : <https://zdmira.com/news/v-niderlandakh-isytyayut-sistemu-avtovedeniya-poezdov-s-distantionnym-upravleniem>. – Дата доступа : 04.10.2023.
- 33 Alstom делает еще один шаг к автономной эксплуатации поездов в Нидерландах [Электронный ресурс] // Alstom SA. – Режим доступа : <https://www.alstom.com/press-releases-news/2022/4/alstom-takes-another-step-towards-autonomous-train-operation-netherlands>. – Дата доступа : 04.10.2023.
- 34 Siemens Mobility обеспечит сигнализацию CBTC для первой беспилотной системы метро в Гаосюне, Тайвань [Электронный ресурс] // Siemens Global Website. – Режим доступа : <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-mobility-provide-cbct-signaling-first-driverless-metro-system-kaohsiung-taiwan>. – Дата доступа : 04.10.2023.
- 35 JR Central нацелен на Токайдо Синкансэн с 2028 года [Электронный ресурс] // Railway Gazette International. – Режим доступа : <https://www.railwaygazette.com/jr-central-targeting-tokaido-shinkanse-n-to-from-2028/63929.article>. – Дата доступа : 04.10.2023.
- 36 Korail внедряет маневровое движение без водителя / [Электронный ресурс] // International Railway Journal. – Режим доступа : <https://www.railjournal.com/technology/korail-introduces-driverless-shunting/>. – Дата доступа : 04.10.2023.
- 37 Автоматизированная монорельсовая система Innovia от Alstom вводится в эксплуатацию в Бангкоке [Электронный ресурс] // Alstom SA. – Режим доступа : <https://www.alstom.com/press-releases-news/2023/6/alstoms-automated-innovia-monorail-system-enters-service-bangkok>. – Дата доступа : 28.10.2023.
- 38 DSB разрешил заказывать автоматизированные поезда S-bane [Электронный ресурс] // Railway Gazette International. – Режим доступа : <https://www.railwaygazette.com/traction-and-rolling-stock/dsb-cleared-to-order-automated-s-bane-trains/64068.article>. – Дата доступа : 04.10.2023.
- 39 Rio Tinto расширяет сеть обращения беспилотных поездов в Австралии / [Электронный ресурс] // Железные дороги мира. – Режим доступа : <https://zdmira.com/news/rio-tinto-rasshiryet-set-obrashcheniya-bespilotnykh-poezdov-v-avstralii>. – Дата доступа : 28.10.2023.
- 40 Бельгийский стартап намерен пустить беспилотные грузовые поезда в Нидерландах [Электронный ресурс] // Железные дороги мира. – Режим доступа : <https://zdmira.com/news/belgijiskij-startap-nameren-pustit-bespilotnye-gruzovye-poezda-v-niderlandakh>. – Дата доступа : 28.10.2023.
- 41 Крутиков, Н. Д. Правовое обеспечение организации движения беспилотных поездов на железных дорогах Российской Федерации / Н. Д. Крутиков, А. В. Сугоровский // Техник транспорта: Образование и практика. – 2023. – Вып. 2. – Т. 4. – С. 193–198.

42 Об Утверждении правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : приказ от 23 июня 2022 г. № 250.

43 **Шурдак, А. В.** Сеть мобильного широкополосного доступа на МЦК. Пути решения текущих проблем. Перспективы дальнейшего развития / А. В. Шурдак // Наука и технологии железных дорог. – 2024. – № 26. – С. 9.

44 Прилежные ученики [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://gudok.ru/news_paper/?ID=1645251&archive=2023.09.06. – Режим доступа : 25.09.2023.

45 **Зубов, А. Н.** «Ласточка» в свободном полете. ОАО «РЖД» выводит беспилотное движение на новый уровень / [Электронный ресурс] / А. Н. Зубов. – Режим доступа : https://gudok.ru/content/science_education/1643428/. – Дата доступа : 23.08.2023.

46 Финансовая отчетность компании ОАО «РЖД» по международным стандартам [Электронный ресурс] // Корпоративный сайт ОАО «РЖД». – Режим доступа : <https://company.rzd.ru/ru/9471?ysclid=lpqcy62q9a689376382>. – Дата доступа : 24.11.2023.

47 Московское центральное кольцо [Электронный ресурс] // Корпоративный сайт ОАО «РЖД». – Режим доступа : <https://www.rzd.ru/ru/9326>. – Дата доступа : 08.12.2023.

48 **Малецкий, К. О.** Исследование пассажиропотоков при обосновании внедрения тактового движения пригородных поездов / К. О. Малецкий, Ан. В. Сугоровский, А. В. Сугоровский // Экономика железных дорог. – 2023. – № 7. – С. 60–72.

Получено 31.05.12.2023

An. V. Sugorovsky, S. N. Kol, A. V. Sugorovsky, N. D. Krutikov. Experience and prospects of automated control train movement.

The existing experience in implementing automated control systems in railway transport is reviewed, their effectiveness in increasing traffic safety and the accuracy of train movement is analyzed. The current state and prospects for the development of automated train traffic control have been studied. Recommendations for further research and implementation of new technologies in railway transport are proposed.

УДК 656.222.3

А. А. ЕРОФЕЕВ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ПАРКА ГРУЗОВЫХ ЛОКОМОТИВОВ БЕЛОРУССКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Выполнен анализ состояния парка грузовых локомотивов белорусской железной дороги, определена величина выбытия локомотивов в период до 2040 года. Выполнена оценка эффективности использования локомотивов разных серий. Даны предложения по реализации мероприятий по продлению сроков службы тепловозов и их модернизации.

Тяговое обеспечение перевозочного процесса является важной составляющей эксплуатационной деятельности, от качества которой напрямую зависит эффективность железнодорожных перевозок.

Развитие локомотивного хозяйства в первую очередь предполагает обновление парка тягового подвижного состава с одновременным решением задач по модернизации инфраструктуры и деповского хозяйства, цифровизации бизнес-процессов, повышению кадрового потенциала [1].

Состояние парка грузовых локомотивов Белорусской железной дороги

Приписной парк локомотивов Белорусской железной дороги в грузовом движении составляет 309 единиц, в том числе: электровозы – 82 единицы; тепловозы – 227 единиц. При этом с истекшим сроком службы (установленным заводом-изготовителем) в инвентарном парке находится 90,4 % грузовых электровозов и 96,9 % грузовых тепловозов.

Тяговый подвижной состав во многом устарел не только физически, но и морально. Как правило, традиционный тяговый подвижной состав требует повышенных расходов на техническое обслуживание и ремонт, потребляет большее количество электроэнергии и топлива на тягу поездов.

Списанию по критериям технического состояния, срока службы и отсутствия запасных частей до 2030 года (таблица 1) подлежит 91 единица локомотивов, из них до 2025 года 25 тепловозов серии М62 и 23 тепловоза 2ТЭ10 [2].

Таблица 1 – План списания тягового подвижного состава на 2021–2030 гг.

ТПС	По годам										Итого до 2025 г.	Итого до 2030 г.
	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030		
М62	3	4	5	7	6	4	5	5	4	7	25	50
2ТЭ10	4	6	5	8	–	3	–	7	3	5	23	41
Всего	7	10	10	15	6	7	5	12	7	12	48	91

При эксплуатации подвижного состава за пределами срока службы ухудшаются показатели безопасности и экономической эффективности, растет ресурсо- и энергоёмкость перевозок. В перспективе возникают угрозы, с одной стороны – резкого повышения расходов на эксплуатацию устаревшего подвижного состава, с другой – невозможности выполнения перевозок из-за физического отсутствия тягового подвижного состава.

Основные характеристики тягового подвижного состава Белорусской железной дороги представлены в таблицах 2, 3. Данные по удельному расходу топлива и электрической энергии по видам движения, тяги и сериям тягового подвижного состава приняты из форм отчетности ТХО-2 «Отчет о расходе топлива и электроэнергии на локомотивы и моторвагонный подвижной состав» за 12 месяцев 2020 года.

Таблица 2 – Основные характеристики грузовых и грузопассажирских тепловозов Белорусской железной дороги

Серия тепловоза	Осевая формула	Мощность, кВт	Передача мощности	Характеристики двигателя				Сила тяги, кН		Расчетная скорость, км/ч	Удельный расход топлива, кг у.т./104 т·км
				Тип	Тактность	Число цилиндров	Удельный расход топлива, кг/кВт·ч	при трогании	расчетная		
2М62К	2(30-30)	2940	Электрическая постоянного тока	2Д49	4	12	0,202	710	392	20,9	35,7
2М62У	2(30-30)	2940	Электрическая постоянного тока	14Д40	2	12	0,215	741	392	20,9	45,6
2М62УК	2(30-30)	2940	Электрическая постоянного тока	2Д49	4	12	0,202	741	392	20,9	34,1
2М62М	2(30-30)	2940	Электрическая постоянного тока	14Д40	2	12	0,218	705	392	20,9	71
2М62УМ	2(30-30)	2940	Электрическая постоянного тока	14Д40	2	12	0,218	741	392	20,9	55
2М62УМК	2(30-30)	2940	Электрическая постоянного тока	2Д49	4	12	0,202	741	392	20,9	44,5
2ТЭ10М	2(30-30)	4412	Электрическая постоянного тока	10Д100	2	10	0,218	928	496	24,6	29,6

Окончание таблицы 2

Серия тепловоза	Осевая формула	Мощность, кВт	Передача мощности	Характеристики двигателя				Сила тяги, кН		Расчетная скорость, км/ч	Удельный расход топлива, кг у.т./104 т·км
				Тип	Тактность	Число цилиндров	Удельный расход топлива, кг/кВт·ч	при трогании	расчетная		
2ТЭ10У	2(30-30)	4412	Электрическая постоянного тока	10Д100	2	10	0,210	928	496	24,6	29,1
2ТЭ10УК	2(30-30)	4412	Электрическая постоянного тока	1А-5Д49	4	16	0,198	928	496	24,6	27,1
2ТЭ10МК	2(30-30)	4412	Электрическая постоянного тока	1А-5Д49	4	16	0,198	928	496	24,6	28,8
ДМ62	30-30	1470	Электрическая постоянного тока	14Д40	2	12	0,218	350	196	20,9	62,1
М62	30-30	1470	Электрическая постоянного тока	14Д40	2	12	0,218	350	196	20,9	50,2
М62К	30-30	1470	Электрическая постоянного тока	2Д49	4	12	0,202	350	196	20,9	38
М62(евр)	30-30	1470	Электрическая постоянного тока	14Д40	2	12	0,218	350	196	20,9	51,1
М62УК	30-30	1470	Электрическая постоянного тока	2Д49	4	12	0,202	370	196	20,9	42,9

Таблица 3 – Основные характеристики грузовых электровозов Белорусской железной дороги

Серия	Осевая формула	ТЭД	Основные характеристики						Сила тяги при трогании, кН	Удельный расход ТЭР	
			часовой режим			длительный режим				кВт·ч/104 т·км	кг у.т./104 т·км
			Мощность, Вт	Сила тяги, кН	Скорость, км/ч	Мощность, Вт	Сила тяги, кН	Скорость, км/ч			
БКГ1	2(20-20)	Переменного тока	–	–	–	9600	533	65	760	83,9	10,3
БКГ2	30-30	Переменного тока	–	–	–	7200	400	65	570	102,6	12,6
ВЛ80С	2(20-20)	Постоянного тока	6520	442,8	51,9	6160	404,4	53,6	678,1	90,1	11,1

Структура существующего парка Белорусской железной дороги определяется группами традиционного и инновационного тягового подвижного состава. Среди локомотивов выделяются тепловозы серий 2ТЭ10У(М), М62, ДМ62, оснащенные устаревшими двухтактными дизельными двигателями, не удовлетворяющими по своим технико-экономическим характеристикам современным требованиям. Анализ показывает необходимость модернизации (ремоторизации, замены) указанных тепловозов, а также дизельпоездов серии ДР1А.

Следует отметить относительно низкие технико-экономические показатели использования электровозов серии БКГ, а также тепловозов серии М62 (в частности, удельный расход топлива), объясняемые избыточной секционной мощностью данного подвижного состава для условий их эксплуатации.

Анализ горизонта срока службы с учетом остаточного ресурса

Парк грузовых тепловозов Белорусской железной дороги включает 227 единиц, основу которых составляют тепловозы серии ТЭ10 (2ТЭ10М – 24 единицы, 2ТЭ10У – 17 единиц, 2ТЭ10МК – 39 единиц, 2ТЭ10УК – 35 единиц), выполняющие 85 % объема перевозочной работы в грузовом движении тепловозной тяги. Данные локомотивы были выпущены в 1987–1991 годах Ворошиловградским тепловозостроительным заводом.

Установленный производителем срок службы составляет 20/26 лет, срок службы с учетом процедуры продления – 45 лет. Динамика выбытия тепловозов данной серии в период до 2040 года приведена на рисунке 1

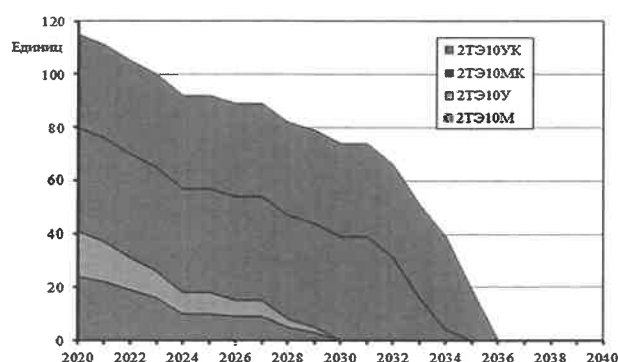


Рисунок 1 – Динамика выбытия тепловозов серии ТЭ10

Таким образом, прогнозируемый период эксплуатации тепловозов данной серии истекает к 2036 году. При этом тепловозы с индексами У и М (оснащенные двухтактными дизельными двигателями серии 10Д100) полностью выбывают уже к 2030 году.

Тепловозы серии М62 различных индексов (одно- и двухсекционные) производства Ворошиловградского тепловозостроительного завода эксплуатируются пре-

имущественно в грузовом (передаточном и вывозном) и хозяйственном видах движений. Двухсекционные тепловозы серий 2М62М, 2М62УМ и 2М62УМК используются в качестве тяговых единиц дизель-поездов ДРБ и ДДБ. Период выпуска данных тепловозов – с 1970 по 1991 год.

По состоянию на 2021 год на Белорусской железной дороге эксплуатируется следующее количество тепловозов данной серии: М62 – 65 единиц (из них 5 – колеи 1435 мм), М62УК – 3 единицы, М62К – 5 единиц (из них 1 – колеи 1435 мм), ДМ62 – 4 единицы, 2М62К – 28 единиц, М62УК – 7 единиц. Установленный производителем срок службы составляет: 37 лет – для М62, 26 лет – для ДМ62 и 2М62У, 20 лет – для 2М62. Срок службы с учетом процедуры продления – 60 лет (45 лет для ДМ62).

Динамика выбытия тепловозов данной серии в период до 2040 года (кроме тепловозов, используемых в дизель-поездах ДРБ и ДДБ) приведена на рисунке 2.

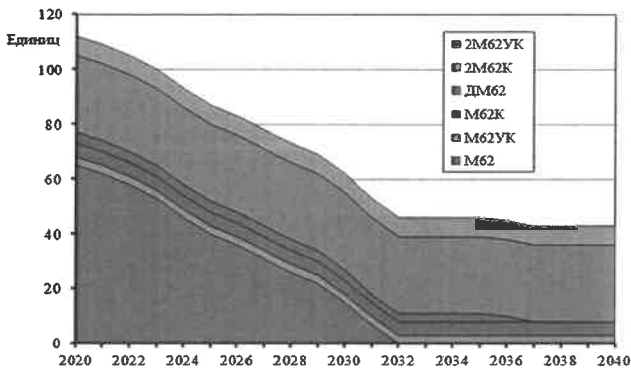


Рисунок 2 – Динамика выбытия тепловозов серии М62 (кроме тепловозов, используемых в дизель-поездах ДРБ и ДДБ)

В рассматриваемый период ожидается полное выбытие односекционных тепловозов серии М62 к 2032 году, составляющих в настоящее время половину парка тепловозов данной серии на Белорусской железной дороге (64 из 135). Данные локомотивы задействованы преимущественно в передаточном и вывозном видах грузового движения. Прогнозируемое ежегодное выбытие равномерное и составляет 5–6 локомотивов в год. Выбытие 4 единиц тепловозов серии ДМ62 ожидается к 2036 году. В рассматриваемый период ожидается полное выбытие односекционных тепловозов серии М62 к 2032 году, составляющих в настоящее время половину парка тепловозов данной серии на Белорусской железной дороге (64 из 135). Данные локомотивы задействованы преимущественно в передаточном и вывозном видах грузового движения. Прогнозируемое ежегодное выбытие равномерное и составляет 5–6 локомотивов в год. Выбытие 4 единиц тепловозов серии ДМ62 ожидается к 2036 году.

Парк электровозов Белорусской железной дороги включает 97 единиц, среди которых 15 пассажирских электровозов серии ЧС4Т производства Škoda (Чехия), выпущенные в 1983 году, а также 52 грузовых электровоза ВЛ80С производства Новочеркасского электровозостроительного завода, выпущенные в 1982–1991 годах; грузовые электровозы производства Да-

тунского локомотивостроительного завода (Китай) (БКГ1 – 12 единиц, БКГ2 – 18 единиц), выпущенные в 2012–2017 годах. Производителями установлены следующие сроки службы: ЧС4Т – 30 лет, ВЛ80С – 33 года, БКГ – 40 лет. Для электровозов ЧС4Т и ВЛ80С установленный срок службы с учетом процедуры продления – 50 лет. Динамика выбытия электровозов в период до 2040 года приведена на рисунке 3.

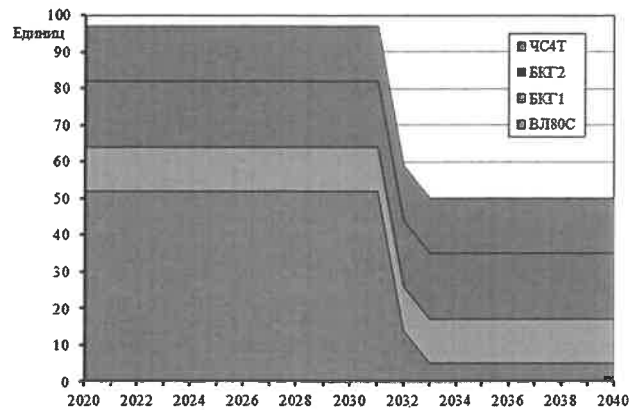


Рисунок 3 – Динамика выбытия электровозов

В период до 2040 года ожидается практически полное выбытие электровозов серии ВЛ80С (в 2031–2033 годах их количество снижается с 52 до 5 единиц). Среди остальных электровозов в указанный период выбытия не ожидается.

Таким образом, по критерию остаточного ресурса до 2030 года на Белорусской железной дороге полностью выбывают грузовые тепловозы серий 2ТЭ10У, М, частично – тепловозы серии М62 (50 из 65). В результате выбытие составит 40 % от общего количества грузовых тепловозов.

После 2030 года в период до 2040 года полностью выбывают тепловозы серий 2ТЭ10УК, МК, оставшиеся тепловозы серии М62. Начинается выбытие грузовых электровозов серии ВЛ80С (47 из 52).

Основные направления развития парка грузовых локомотивов Белорусской железной дороги.

Основной объем перевозочной работы в магистральном грузовом движении тепловозной тяги (до 85 %) выполняется на локомотивах серий 2ТЭ10У, М, УК, МК. Частичная ремоторизация тепловозов индексов М, У (в количестве 74 единиц) на Белорусской железной дороге была произведена в 2008–2015 годах.

Замена дизельных двигателей при проведении капитальных ремонтов тепловозов 2ТЭ10М(У) в перспективе с последующим продлением назначенного срока службы до 60 лет позволит обеспечить их эксплуатацию на период до 2050 года. При ремоторизации данных тепловозов достигаются следующие цели:

- снижение расходов на эксплуатацию и техническое содержание;
- повышение безопасности движения;
- повышение надежности в эксплуатации;
- улучшение условий труда локомотивных бригад.

Дизельный двигатель, как основной узел тепловоза, подвержен наибольшему износу. На его долю приходится порядка 40–45 % расходов от общей стоимости

ремонта тепловоза, а от эффективности его работы зависит расход топливно-энергетических ресурсов, а также надежность тепловоза.

Разработанные в 1940–1950-х годах двухтактные дизельные двигатели серии 10Д100 тепловозов 2ТЭ10М(У) морально и физически устарели. За счет износа базовых элементов двигателя 10Д100 стоимость его ремонтов ежегодно возрастает в среднем на 8 %. Кроме того, номенклатура выпускаемых запасных частей для ремонта указанных двигателей существенно сокращается.

Обновление приписного парка тепловозов и дизель-поездов методом ремоторизации является широко применяемой практикой железнодорожных администраций.

Так, Литовские железные дороги (Lietuvos geležinkeliai) заменили двигатели на 54 тепловозах серии 2М62 путем установки дизельных двигателей серии 5Д49 производства ОАО «Коломенский завод» и дизельных двигателей CAT3512 производства компании «Caterpillar». С 2001 года, для нужд ОАО «РЖД» на Уссурийском локомотиворемонтном заводе выполняется ремоторизация тепловозов серии 2ТЭ10М(У) путем установки дизельных двигателей производства ОАО «Коломенский завод». В настоящее время ремоторизовано уже более 1500 секций. При этом стоимость данной ремоторизации в 1,9 раза превышает стоимость ремоторизации тепловозов в условиях Белорусской железной дороги. АО «Қазақстан Темір Жолы» ремоторизовало более 500 локомотивов серии 2ТЭ10У(М) путем установки дизельных двигателей «General Electric».

В условиях Белорусской железной дороги при проведении ремоторизации указанных тепловозов выполнялись следующие виды работ:

– замена двухтактных дизельных двигателей 10Д100 на четырехтактные двигатели типа Д49 (1А-9ДГисп-3), оборудованные электронными регуляторами частоты вращения;

– установка микропроцессорной системы управления и регулирования электрической передачи тепловоза УСТА;

– оборудование кабины машиниста унифицированным пультом управления с системой диагностики параметров работы дизель-вспомогательного оборудования, комплексным устройством безопасности КЛУБ-У, кондиционером, новыми эргономичными креслами для локомотивной бригады, лобовыми и боковыми стеклами и зеркалами заднего вида с подогревом, стеклоочистителями с электроприводом и стеклоомывателями.

Пригодные для дальнейшего применения узлы и запасные части, образовавшиеся в процессе ремоторизации, были оприходованы установленным порядком и использованы при ремонте оставшихся тепловозов с дизельными двигателями типа 10Д100.

Эксплуатация указанных тепловозов показала экономическую целесообразность ремоторизации за счет снижения расхода топлива (на 3–5 %), масла (в 4,2 раза), увеличения межремонтных пробегов (на 20 %) снижения внеплановых простоев на ремонтах ввиду отсутствия запасных частей.

В настоящее время ориентировочная стоимость капитального ремонта тепловоза серии 2ТЭ10М(У) по циклу КР-2 с ремоторизацией дизелем типа Д49 в условиях Белорусской железной дороги составляет 1,682 млн дол. США (4,272 млн руб. на 03.12.2021).

Следует отметить, что стоимость новых грузовых магистральных локомотивов, таких как 2ТЭ25К^М, составляет не менее 3,750 млн дол. США (9,525 млн руб. на 03.12.2021). При этом покупка данного тепловоза предполагает его последующее техническое содержание в условиях организации-изготовителя, что еще больше увеличивает данную стоимость. В противном случае приобретение новых локомотивов повлечет за собой дополнительные финансовые затраты на создание базы по их содержанию и обслуживанию.

При оборудовании одного двухсекционного тепловоза 2ТЭ10М(У) дизельными двигателями производства «Caterpillar» с установкой нового синхронного тягового генератора, выпрямительной установки, а также с изменением силовой и вспомогательной электрических цепей управления стоимость проекта ремоторизации увеличивается до 2,944 млн дол. США (7,478 млн руб. на 03.12.2021). Кроме того, для ремонта и обслуживания указанных двигателей потребуются создание базы для их обслуживания, что также приведет к дополнительным финансовым затратам.

Таким образом, ремоторизация указанных тепловозов дизельными двигателями типа Д49 (1А-9ДГисп-3) является наиболее приемлемым вариантом формирования структуры их жизненного цикла на период до 2040 года. В настоящее время в локомотивных депо, выполняющих капитальный ремонт тепловозов данной серии, имеется всё необходимое оборудование для ремонта, диагностики и обслуживания данных двигателей.

Проведение ремоторизации всему оставшемуся парку тепловозов 2ТЭ10М(У) целесообразно, так как часть их (15 единиц) прошла капитальные виды ремонта, в связи с чем проведение повторных ремонтов с ремоторизацией до окончания назначенного срока службы не является экономически оправданным.

Последовательность ремоторизации тепловозов с установкой дизельных двигателей типа Д49, на общую сумму 37,002 млн дол. США (93,984 млн руб. на 03.12.2021) при выполнении им капитальных ремонтов КР-1, КР-2 в локомотивных депо Жлобин и Витебск в период с 2022 по 2025 год приведена в таблице 4.

Таблица 4 – Периодичность выполнения работ по ремоторизации тепловозов серии 2ТЭ10М(У)

Вид ремонта	Количество тепловозов по годам				Итого до 2025 г.
	2022	2023	2024	2025	
КР-2	6	4	1	0	11
КР-1	2	2	3	4	11
<i>Всего</i>	8	6	4	4	22
Стоимость, млн руб.	34,176	25,632	17,088	17,088	93,984

Указанная ремоторизация позволит обеспечить потребность парка в магистральных грузовых тепловозах до 2029 года без дополнительных закупок.

Тепловозы серии М62 выбывают ввиду истечения срока службы, технического состояния несущих элементов конструкции, а также отсутствия запасных

частей, узлов и комплектующих для надлежащего технического содержания. Используемый двухтактный дизельный двигатель 14Д40 характеризуется повышенным удельным расходом топлива. Ежегодно Белорусская железная дорога ремонтирует в условиях АО «Даугавпилсский локомотиворемонтный завод» 7–10 блоков цилиндров дизеля 14Д40 (ориентировочная стоимость каждого ремонта составляет 10,3 тыс. дол. США (26,2 тыс. руб. на 03.12.2021)). По остаточному ресурсу и технико-экономическим характеристикам модернизацию либо ремоторизацию указанных тепловозов выполнять нецелесообразно. Тепловозы серий М62К, М62УК, 2М62К, 2М62УК в прогнозируемый период эксплуатируются без изменений.

Тепловозы серии ДМ62 целесообразно подвергнуть ремоторизации с заменой двигателей 14Д40 на 5Д49 и последующим продлением срока службы до 2046–2052 годов. Последовательность ремоторизации данных тепловозов на общую сумму 1,819 млн дол. США (4,620 млн руб. на 03.12.2021) в период с 2023 по 2027 год приведена в таблице 5.

Таблица 5 – Периодичность выполнения работ по ремоторизации тепловозов серии ДМ62

Вид ремонта	Количество тепловозов по годам			Итого до 2027 г.
	2023	2025	2027	
КР-2	1	1	2	4
<i>Всего</i>	1	1	2	4
Стоимость, млн руб.	1,155	1,155	2,310	4,620

Получено 31.05.2024

A. A. Erofeev. Analysis of the state and direction of development of the fleet of freight locomotives of the Belarusian Railway.

The article analyzes the state of the fleet of freight locomotives of the Belarusian railway, and determines the amount of locomotive retirement in the period up to 2040. The efficiency of using locomotives of different series was assessed. Proposals were given for the implementation of measures to extend the service life of diesel locomotives and their modernization.

Электровозы. В прогнозируемый период до 2040 года ожидается практически полное выбытие электровозов серии ВЛ80С (в 2031–2033 годах их количество снижается с 52 до 5 единиц), что образует существенный дефицит в данной группе тягового подвижного состава. Приемлемым техническим решением является разработка к 2027 году методики продления срока службы данных локомотивов до 60 лет. В случае увеличения потребного парка электровозов после 2030 года потребуется их дополнительная закупка (предпочтительны универсальные грузо-пассажирские локомотивы мощностью до 6000 кВт).

Выводы. Реализация программы модернизации локомотивов грузового движения в совокупности с реализацией мероприятий по продлению установленного срока службы локомотивов является высокоэффективным технологическим мероприятием. Ее реализация позволит существенно сократить потребность в приобретении подвижного состава и обеспечить выполнение плана поездной работы.

Список литературы

1 Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 28 апреля 2016 г. № 345 «Об утверждении Государственной программы развития транспортного комплекса Республики Беларусь на 2016–2020 годы». – Минск, 2016.

2 Отчет о выполненной работе «Разработка программы обновления локомотивов и моторвагонного подвижного состава на 2021–2025 год, с учетом горизонта оценки до 2030 года»; договор от 15 октября 2021 г. № Т/Ю-475/15095. – Гомель, 2022. – 225 с.

ПОДГОТОВКА КАДРОВ

УДК 37.013, 378

М. Г. ГЕГЕДЕШ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, Гомель

ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРИНЦИПОВ КОНЦЕПЦИИ ПЕДАГОГИКИ УДИВЛЕНИЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА

Исследованы возможности применения общих принципов концепции педагогики удивления при подготовке специалистов, работа которых связана с транспортным комплексом и иными промышленными направлениями.

Введение. В процесс образования входят три заинтересованные стороны: общество (предприятия), профессорско-преподавательский состав и студенты. Каждая из сторон оказывает существенное влияние на успехи или провалы системы. Не последнюю роль играет государственно-частное партнерство и система взаимодействия «университет – транспортный комплекс». Выпускники-инженеры должны обладать навыками межличностного общения, командной работы, умением ставить цели, способностями к лидерству, хорошей мотивацией к работе и личностному росту, а также творческим мышлением, о чем неоднократно говорят ученые стран СНГ [1–3] и дальнего зарубежья [4–6]. Как демонстрируют мировые тенденции, специалисты, способные выполнять только рутинный ручной и рутинный мыслительный труд, становятся всё менее востребованными в современных организациях [7]. При этом повышается спрос на специалистов с хорошей базой, которые владеют навыками коммуникации, командной работы и критического мышления (рисунок 1).

В образовательных учреждениях дошкольного и школьного уровней, а также в учреждениях дополни-

тельного образования обучающиеся, как правило, взаимодействуют с обучающим, в основном, в соответствии с моделью «Воспроизведение по примеру». Эта модель отлично себя зарекомендовала в области ручного труда, однако оказывает негативное влияние на развитие у будущих студентов и специалистов умения думать, формирующего поле для технического и иного творчества и основы для развития профессионального критического мышления в своей деятельности.

Концепция педагогики удивления предложена Степичевым П. А. [7] и изначально разработана для решения подобных проблем при обучении английскому языку в школьных образовательных учреждениях, однако некоторые положения этой концепции можно применить и при подготовке студентов технических вузов, в том числе, транспортных.

Таким образом, цель представленной работы заключается в исследовании возможностей применения общих принципов концепции педагогики удивления в учебном процессе транспортного вуза и разработке предложений по их внедрению с учетом особенностей преподаваемых в транспортном вузе дисциплин.

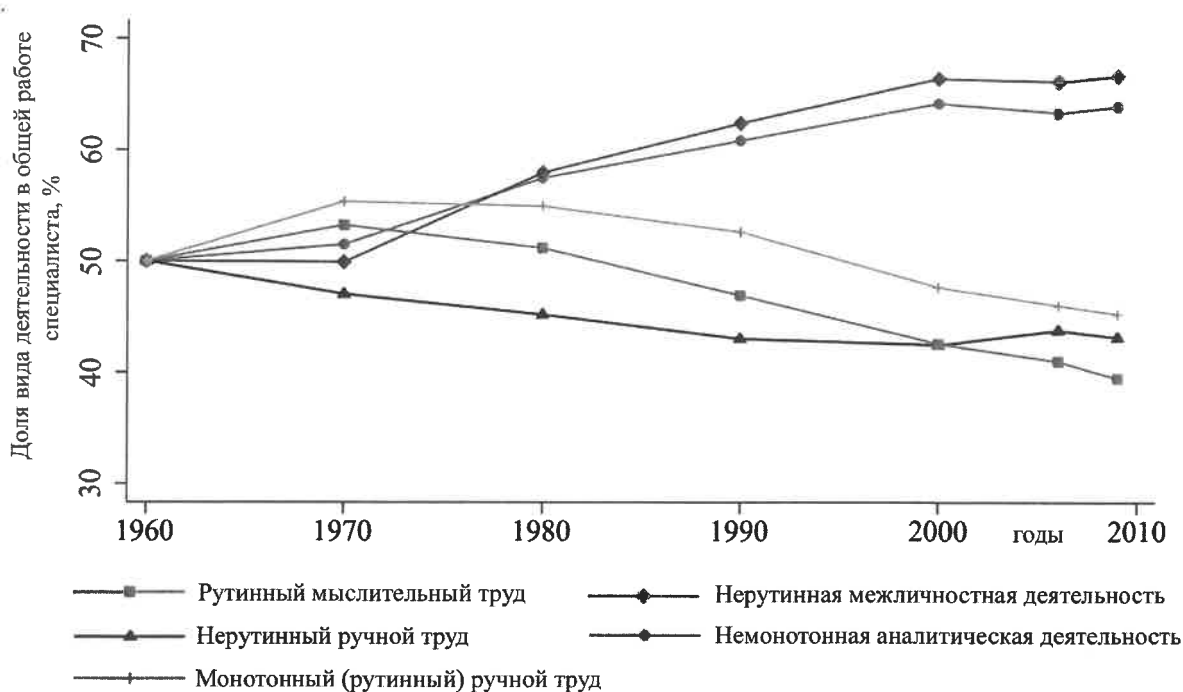


Рисунок 1 – Доля вида деятельности в общей работе специалиста [7]

Общие положения концепции. Суть педагогики удивления заключается в таком формате проведения учебных занятий, при котором заинтересованность и мотивированность студента формируются за счет удивления, которое является признаком небезразличного отношения к информации. Например, просмотр сочной, яркой картинки с каким-либо блюдом у человека вызывает аппетит. Концепция педагогики удивления подразумевает, что процесс познания тоже должен вызывать аппетит, тягу и стремление к изучению нового.

Педагогика удивления – это педагогика отношений, а не требований, так как преподаватель создает поле отношений для дальнейшей совместной познавательной деятельности. В основе педагогики удивления лежит принцип учета интересов, жизненной ситуации, особенностей и уровня развития, а также активности и свободы творчества. Педагогика удивления продолжает гуманистическое течение, где главной является личность как объект воспитания и обучения.

Базовые элементы педагогики удивления.

1 *Удивление фактом.* С помощью интересных фактов, связанных с преподаваемой дисциплиной, можно вызвать желание получить больше информации об этом факте и дисциплине в целом, а также мотивировать студента осуществлять дальнейший самостоятельный поиск интересных фактов по изучаемому вопросу или предмету.

2 *Удивление методом.* Имеется в виду то, как педагог преподнесит информацию, владение инструментарием. Неординарная презентация для преподнесения даже элементарной информации может оказать нужный эффект. Занятие в виде игры или компьютерные эксперименты могут быть проведены с помощью современного инженерного программного обеспечения, например, инженерных комплексов MSC Adams, ANSYS, Universal Mechanism, Comsol Multiphysics, PVA Train Dispatcher, TrainSim, 4logist, программы для маршрутизации Relog и др. Эффект заключается в появлении обратной связи от студентов.

3 *Удивление образовательной средой,* в которой происходит обучение студента. Оформление кабинета, стендов, использование макетов, инновационных технологий и т. д.

4 Удивление собственным потенциалом учащегося – это самый сильный инструмент, позволяющий влиять на внутреннюю мотивацию.

Реализация принципов концепции на занятиях в транспортном вузе. Удивление фактом обычно происходит в начале занятия с использованием вопросов «Знаете ли вы...?», «Верите ли вы, что...?».

Пример 1. Дисциплина «Общий курс транспорта».

Знаете ли вы, что такое Калифорнийский зефир, Кардинал, Старлайт, Sunset Limited, Техасский Орёл и Серебряная звезда? Это названия фирменных ночных поездов в США.

Желательно продемонстрировать, как выглядят эти поезда, после ответа.

Пример 2. Дисциплина «Иностранный язык».

Верите ли вы, что английский язык не является государственным в США? Да, это так, просто потому, что там, в принципе, нет документа, утверждающего государственный язык.

Верите ли Вы, что в штате Калифорния в США говорят более чем на 200 языках? Более чем на 255 языках.

Пример 3. По дисциплинам «Архитектура», «Промышленное и гражданское строительство» можно искать факты, связанные с интересными конструкциями зданий и сооружений.

Например, где находится демонстрируемый трехэтажный дом с общей площадью 23 м²? В столице Южной Кореи Сеуле. Под каким названием он известен? Махmini. Какие материалы использованы для строительства? Бетон и пластик.

Пример 4. Дисциплина «Физика».

Знаете ли вы, сколько лет было Альберту Эйнштейну, когда он напечатал свои пять основных работ? 26 лет.

Для реализации принципа удивления методом можно использовать бонусные мотивационные карточки (рисунок 2), которые студент вытаскивает из стопки. Карточки выдаются за успехи в изучении дисциплины. Владелец карточки, например, может наделяться правом получить дополнительный балл, попросить не ставить тройку другу, воспользоваться на экзамене конспектом в течение 5 минут и т. п. Набор карточек и их содержание определяет преподаватель.

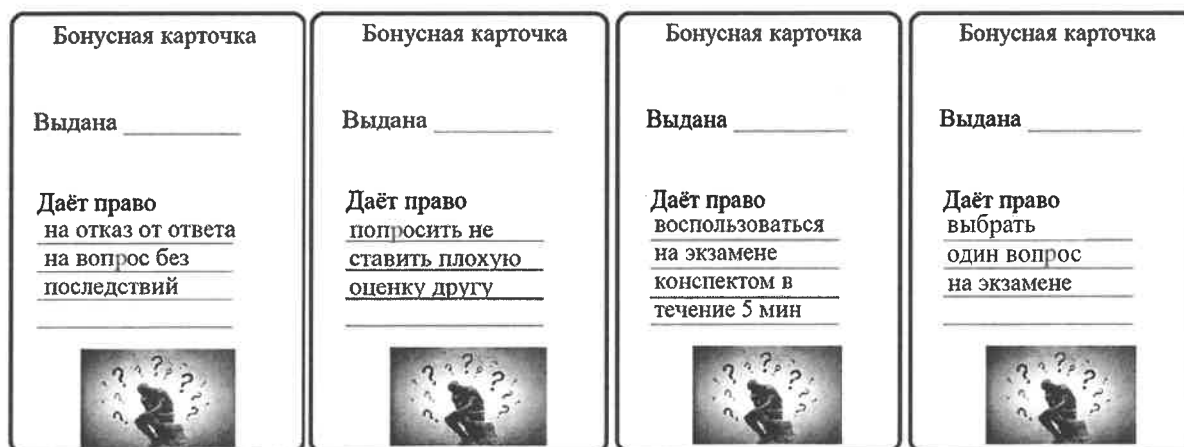


Рисунок 2 – Варианты реализации бонусных карточек для студентов

Реализация удивления образовательной средой представлена на рисунке 3.

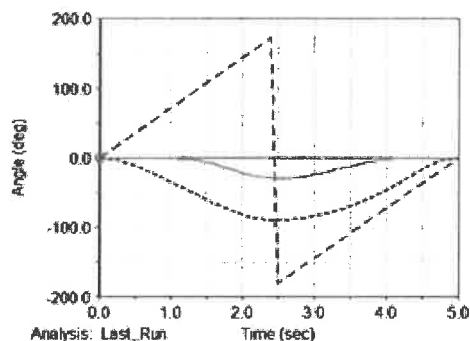
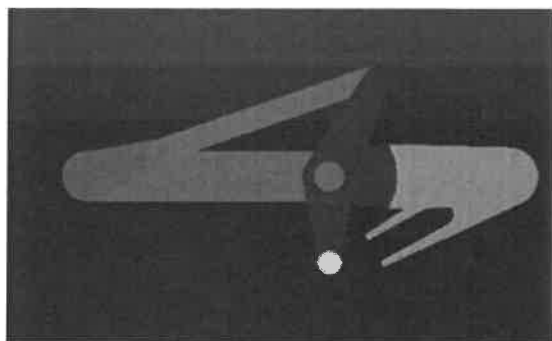
Пример 1 Дисциплины «Теоретическая механика», «Производство погрузочно-разгрузочных работ». Как представить работу машины или механизма, если нет наглядных макетов? С помощью компьютерного моделирования, например, в инженерном программном комплексе MSC ADAMS, Universal Mechanism, ANSYS.

Пример 2 Дисциплина «Инженерная графика». Как разобраться с видами? Как научиться ориентироваться в 3D пространстве? Создать модель в компьютерной программе, распечатать на 3D принтере.

Пример 3 Дисциплина «Механика материалов и конструкций». Предложение рассчитать нагрузки (можно в упрощенном виде), испытываемые интересным реальным объектом, например, подводным отелем Мурака (Мальдивы).

Пример 4 Дисциплина «Управление эксплуатационной работой». Использование физических моделей путей, поездов и станций, имитация реальной работы диспетчеров и дежурных по станциям. Применение

a)



б)

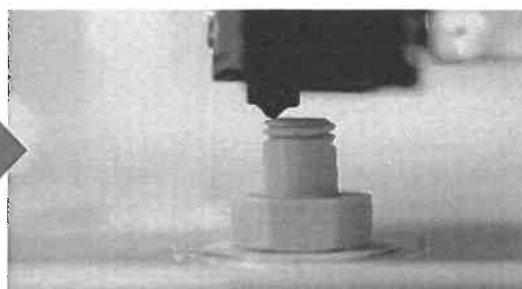
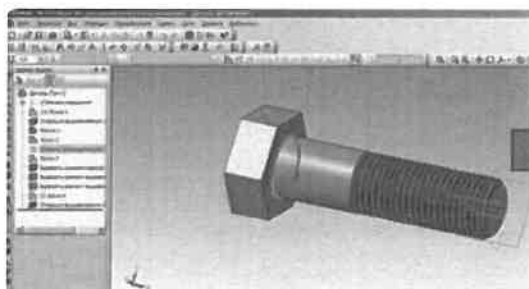


Рисунок 3 – Наглядная демонстрация работы механизмов (а) и проектируемых деталей (б) транспортных средств

Второй подход для усиления собственного потенциала студентов подразумевает организацию командной работы (не групповой работы). Рекомендуется использовать подход Timed Round Robin [9], который заключается в разбиении студентов на группы из 4 человек. В каждой из них есть участник под номерами 1–4. После объяснения новой темы участники каждый по очереди своей группе за ограниченное время (например, 1 минуту) должны рассказать суть пройденного материала. Сначала первый, потом второй и т. д. Затем преподаватель опрашивает фронтально кого-либо из группы (рисунок 4).

Таким образом, четыре ключевых навыка будущего успешного специалиста транспортного комплекса смогут прорабатываться на занятиях.

компьютерного моделирования, например, в программе PVA Train Dispatcher.

Пример 5. Дисциплина «Логистика», «Производство погрузочно-разгрузочных работ. Терминалы». Использование программных комплексов для разработки схем перегрузки грузов с одного вида транспорта на другой, оптимальной загрузки транспортного средства и т. п. Например, TruckLoader, JetLoader, Logimus и т. д.

В рамках преподавания любой дисциплины можно реализовать принцип удивления студентов их собственным потенциалом. Например, на занятиях по механике реализуется такой вариант: первые 2–3 самостоятельные работы даются «по возможностям», то есть, студентам послабее – более простые варианты, а более сильным – посложнее. В результате это дает возможность студентам с более слабой школьной подготовкой поверить в свои силы, а студентам с более сильной базой – убедиться в том, что они не зря старались в школе. Такой подход способствует сглаживанию неравномерностей общего уровня владения предметом у студентов.



Рисунок 4 – Схема взаимодействия в команде по методу Метод «Timed Round Robin» [9]

Коммуникативные навыки, критическое мышление и командная работа могут быть проработаны с помощью подхода Timed Round Robin. Креативное мышление – с помощью подхода Same but different [10]. Он подразумевает отметание поверхностных ответов, поиск нестандартных вариантов.

Будущие инженеры должны обладать умениями, которые можно описать как 4К-навыки (рисунок 5): умением выстраивать профессиональные взаимоотношения на основе коммуникационных навыков, способностями критически мыслить, понимать и просчитывать возможные риски, сотрудничать с другими специалистами, работать в команде, а также предлагать нестандартные варианты решения задач.



Рисунок 5 – Схема 4К-умений

Подходы, предлагаемые педагогией удивления, позволяют получить уверенного в себе и своих силах специалиста, обладающего к тому же и способностью к аналитическому мышлению, к творчеству, без проблем работающего как индивидуально, так и в команде. То есть обладать так называемыми «гибкими» (soft skills или поведенческая и личная компетентность) и «основополагающими профессиональ-

ными» (hard skills или техническая компетентность) навыками.

Список литературы

- 1 **Ануфриева, Т. Н.** Компонентный состав гибких навыков современного инженера / Т. Н. Ануфриева // Научно-педагогическое обозрение. Pedagogical Review. – 2023. – № 4 (50). – С. 7–16.
- 2 Система подготовки инженерных кадров в современной России: образовательные траектории и контроль качества / А. Н. Данилов [и др.] // Высшее образование в России. – 2018. – № 3. – С. 5–15.
- 3 **Флек, М. Б.** Взаимодействие вуза и предприятия: опыт базовой кафедры в подготовке инженерных кадров / М. Б. Флек, Е. А. Угнич // Университетское управление: практика и анализ. – 2020. – Т. 24, № 3. – С. 122–136.
- 4 The impact of project-based learning on improving student learning outcomes of sustainability concepts in transportation engineering courses / E. H. Fini [et al.] // European Journal of Engineering Education. – 2018. – Vol. 43, no. 3. – P. 473–488.
- 5 Supporting the development of engineers' interdisciplinary competence / L. R. Lattuca [et al.] // Journal of Engineering Education. – 2017. – Vol. 106, no. 1. – P. 71–97.
- 6 **Moore, T.** The myth of job readiness? Written communication, employability, and the 'skills gap' in higher education / T. Moore, J. Morton // Studies in higher education. – 2017. – Vol. 42, no. 3. – P. 591–609.
- 7 **Autor, D. H.** The Changing Task Composition of the US Labor Market: An Update of Autor, Levy, and Murnane / D. H. Autor, B. Price // MIT Working Paper. – 2013. – P. 19.
- 8 **Степичев, П. А.** Педагогика удивления: новая парадигма образования в XXI веке / П. А. Степичев // Paradigmata poznání. – 2015. – № 4. – С. 35–38.
- 9 **Gea, H. Y. F.** Improving students' speaking skill by using round robin brainstorming technique to the eleventh grade students of sma deli murni bandar baru / H. Y. F. Gea, J. J. Pangaribuan, N. Sembiring // KAIROS. – 2019. – Vol. 3, no. 1. P. 27–41.
- 10 **Weiss, S.** Coda: Creativity in psychological research versus in linguistics—Same but different? / S. Weiss, O. Wilhelm // Cognitive Semiotics. – 2020. – Vol. 13, no. 1. – 20202029.

Получено 22.03.2024

M. G. Gegedesh. Possibilities of implementing the principles of the concept of pedagogy of surprise in the training of specialists for the transport complex.

The paper demonstrates the investigation of the possibilities of applying the general principles of the concept of pedagogy of surprise in the training of specialists whose work is related to the transport complex and other industrial areas.

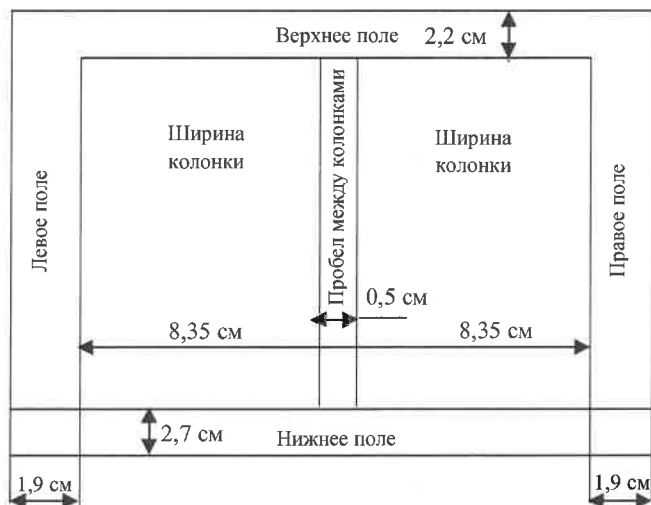
ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Статьи, направляемые в редакцию журнала «Вестник БелГУТа: Наука и транспорт», должны соответствовать следующим требованиям.

1 Материал статьи должен отражать профиль журнала и излагаться предельно ясно на белорусском или русском языке. На оборотной стороне последнего листа ставится подпись автора (авторов) и указывается название рубрики, к которой относится статья.

2 Статья должна быть представлена в одном экземпляре на бумажном носителе [для иногородних – по почте (адрес электронной почты: tatiana-101@list.ru)] и тщательно отредактирована. Одновременно текст статьи представляется в формате текстового редактора MS Word в виде обычного текстового файла – по фамилии автора (авторов), гарнитура шрифта – Times New Roman.

3 Текст статьи должен быть оформлен в соответствии с ГОСТ 7.5–98 «Журналы, сборники, информационные издания. Издательское оформление публикуемых материалов», ГОСТ 2.105–95 «Межгосударственный стандарт. Общие требования к текстовым документам» и напечатан на белой бумаге формата А4 на лазерном принтере. Объем статьи – 0,35 авторского листа (14000 печатных знаков, включая пробелы между словами, знаки препинания и др.), т. е. не более трех полных страниц текста формата А4, напечатанного в две колонки размером шрифта (кегель) 10 pt по следующему образцу:



4 Текст статьи должен содержать:

– в левом верхнем углу первой страницы – индекс УДК (размер шрифта – 10 pt).

– через интервал на формат 17,2 см – инициалы и фамилия автора (авторов) прописным светлым курсивом, а учёная степень, наименование и местонахождение организаций, в которых работают авторы, – строчным светлым курсивом 10 pt;

– ниже, через интервал на формат 17,2 см – название статьи, напечатанное прописными буквами, жирным шрифтом, без переносов (высота букв – 11 pt), которое должно отражать основную идею выполненного исследования, быть по возможности кратким, содержать ключевые слова, позволяющие идентифицировать данную статью;

– через интервал на формат 17,2 см – аннотация, в которой дается краткая характеристика статьи (размер шрифта – 9 pt, объём – до 10 строк, или 100–150 слов);

– через интервал в две колонки форматом 8,35 см каждая, с интервалом между ними 0,5 см – текст статьи (размер шрифта – 10 pt), межстрочный интервал – одинарный, абзац – 5 мм, или 3 печатных знака;

– через интервал в две колонки форматом 8,35 см каждая – список литературы (размер шрифта – 9 pt);

– через интервал – дата поступления рукописи в редколлегию (размер шрифта – 8 pt); например: Получено 05.06.2009;

– через интервал на формат 17,2 см – фамилия, инициалы автора (авторов) – прямым жирным строчным шрифтом 10 pt, название статьи – светлым строчным прямым шрифтом 10 pt; аннотация статьи на английском языке шрифтом 9 pt.

5 Научная статья должна включать:

– введение, где должен быть дан краткий обзор литературы по данной проблеме. Указаны не решенные ранее вопросы, сформулирована и обоснована цель работы, т. е. поставлена задача;

– основную часть, содержащую описание методики, аппаратуры, объектов исследования и подробное освещение содержания исследований, которые могут быть иллюстрированы графиками или подтверждены расчетами в табличной форме. Полученные результаты должны быть проанализированы с точки зрения их научной новизны и сопоставлены с соответствующими известными данными. Основная часть также может делиться на подразделы (с разъяснительными заголовками). Иллюстрации, формулы, уравнения и сноски, встречающиеся в статье, должны быть пронумерованы в соответствии с последовательностью их размещения в тексте;

– заключение, в котором в сжатом виде формулируются основные полученные результаты с указанием их новизны, преимуществ и возможностей применения.

6 Графический материал в статье (рисунки, схемы, диаграммы) должен содержать не более пяти рисунков и быть оформлен в соответствии с требованиями Р 50-77-88 «Рекомендации ЕСКД. Правила выполнения диаграмм». Каждый рисунок должен иметь название (размер шрифта – 9 pt светлым строчной), которое размещается под ним (например: Рисунок 1 – Схема управления электродвигателя). Надписи на самих рисунках набирают шрифтом 9 pt. Размещают рисунок после ссылки на него в тексте. Сканированные рисунки редколлегией не принимаются.

7 Таблицы (не более трех) располагаются непосредственно после текста, где они впервые упоминаются. Каждая таблица должна иметь номер и название, которое размещается над ней (например: *Таблица 1 – Результаты измерений*). Размер шрифта названия и основного текста таблицы – 9 pt, головки (шапки) – 8 pt.

8 Размерности всех величин, используемых в тексте, должны соответствовать Международной системе единиц (СИ).

9 Формулы набирают тем же размером шрифта и той же гарнитурой, что и основной текст (буквы русского и греческого алфавитов, числа, знаки математических функций – прямым шрифтом, латинские буквы – курсивом).

10 К рукописи прилагаются:

– сведения об авторе [Ф. И. О. полностью, ученая степень и звание, место работы и должность, домашний адрес, контактный телефон (служебный, мобильный, e-mail)];

– рекомендация кафедры, научной лаборатории или учреждения, в котором выполнена работа, о целесообразности публикации статьи;

– экспертное заключение о возможности публикации статьи.

11 Рукописи, которые не соответствуют указанным требованиям, к рассмотрению не принимаются.

12 Редколлегия по предварительной научно-технической экспертизе может направлять статью на рецензию специалисту и с учетом этой рецензии даёт аргументированное заключение о возможности публикации статьи.

Редактор *А. А. Павлюченкова*
Технический редактор *В. Н. Кучерова*
Компьютерная верстка – *С. В. Ужанкова*

Подписано в печать 28.06.2024 г. Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.
Печать на ризографе. Усл. печ. л. 12,09. Уч.-изд. л. 12,17. Тираж 100 экз. Изд. № 34. Зак. № 1382.

Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта»
ЛП № 02330/238 от 14.04.2014 г.
Ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель