

ВЕСТНИК
Белорусского
Государственного
Университета
Транспорта

Научно-практический журнал

НАУКА
и ТРАНСПОРТ

№ 2(51)/2025

ВЕСТНИК БелГУТа: НАУКА И ТРАНСПОРТ

Научно-практический журнал № 2 (51) 2025 года

Издается с апреля 2000 года

Выходит один раз в полугодие

Учреждители:

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

Главный редактор *Н. Н. КАЗАКОВ*

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

Редакционная коллегия:

*В. Е. ВЕРЕНИЧ, А. В. ПУТЯТО, Ю. М. ПЛЕСКАЧЕВСКИЙ, Н. К. ТУРСУНОВ,
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

2025. № 2 (51)

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ

- Розенберг Е. Н., Пенькова Н. Г., Ипатов С. В., Бочков К. А. Анализ методов построения функционально безопасных структур на элементной базе различной сложности..... 4
- Комнатный Д. В. Задачи по переходным процессам в курсе теоретических основ электротехники для специалистов по сигнализации, централизации и блокировки..... 14

ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

- Васильев А. А., Ткачева М. И., Агеева К. Э., Савельева А. В. Прогнозирование глубины коррозионных повреждений стальной арматуры для бетонов различных классов по прочности на сжатие в условиях открытой атмосферы..... 18
- Романенко В. В. Оптимизация процесса изготовления составных деревянных шпал..... 21
- Романенко В. В., Горбань Н. А. Оценка эффективности технологии перекладки стрелочных переводов с усилением подрельсового основания..... 24

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ

- Бурченков В. В., Чумаков В. М. Оценка влияния информации о типе буксовых узлов грузовых вагонов на точность измерений температуры греющихся букс..... 27
- Попрукайло А. В., Костюкович Г. А., Овчинников Е. В., Калынов Д. С. Особенности конструкции карданного вала привода генератора кондиционирования воздуха пассажирских вагонов..... 31
- Емельянова К. А., Чернин Р. И. Применение предиктивной диагностики для железнодорожного подвижного состава и его элементов 36
- Комаровский Н. В., Отока А. Г., Гегедеш М. Г. Особенности комплексных испытаний цилиндрических пружин сорного подвешивания тележки грузовых вагонов железнодорожного подвижного состава 39

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА

- Ерофеев А. А., Ляпоров Д. В. Теоретические подходы к формированию цифровых двойников железнодорожных участков 44
- Ерофеев А. А., Хэ Хун. Модель комплексной оптимизации схем формирования составов и остановок поездов на пригородных железнодорожных линиях 49
- Хэ Хун. Моделирование схем формирования составов и режимов остановок поездов на пригородной железнодорожной линии Гуанчжоу – Цинхай и восточной кольцевой линии Гуанчжоу..... 53
- Михальченко А. А. Особенности управления персоналом при выполнении пассажирских перевозок в современных условиях 56
- Власюк Т. А. Типология пространственно-планировочных моделей размещения инфраструктуры железнодорожного транспорта в агломерации..... 63

АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ

УДК 629.067:004.42

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО БЕЗОПАСНЫХ СТРУКТУР НА ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЕ РАЗЛИЧНОЙ СЛОЖНОСТИ

Е. Н. РОЗЕНБЕРГ, доктор технических наук, Н. Г. ПЕНЬКОВА, С. В. ИПАТОВ, АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации и связи на железнодорожном транспорте, г. Москва; К. А. БОЧКОВ, доктор технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Представлен сравнительный анализ централизованной и распределённой архитектур функционально безопасных систем с учётом эффективности фоновое тестирования и количественной оценки безопасности по показателю *PFH* (Probability of Dangerous Failure per Hour). Рассмотрено влияние числа реализуемых функций, сложности программного обеспечения и фактора отказов по общей причине на длительность цикла диагностики и уровень функциональной безопасности. Показано, что, хотя при небольшом числе функций централизованная архитектура может обеспечивать более короткий цикл тестирования, при учёте рисков, связанных с программным обеспечением распределённая архитектура демонстрирует значительные преимущества за счёт изоляции компонентов, снижения объёма и сложности программного кода на узел, а также уменьшения вероятности отказов по общей причине. На основе проведённого анализа предложены критерии выбора архитектуры на ранних этапах проектирования.

Введение. Обеспечение функциональной безопасности ответственных систем требует не только аппаратной надёжности, но и эффективных механизмов постоянного контроля их работоспособности. Одним из важных инструментов для этого является фоновое тестирование, которое позволяет проверять ресурсы вычислительного устройства в периоды простоя основных рабочих, технологических, процессов системы [1]. К основным характеристикам такого метода диагностирования, оказывающим влияние на выполнение требований безопасности, относятся полнота контроля и длительность полного цикла проверки. Данные параметры тестирования напрямую зависят от архитектуры системы. Каждая из архитектур обладает своими ограничениями и преимуществами, с учётом которых разработчиками на стадии планирования системы делается выбор в ту или иную сторону.

В данной статье рассматриваются две архитектуры, использующие элементную базу различной сложности: централизованная и распределённая.

Под «функцией» в рамках данной статьи понимается логически завершённый и автономный модуль системы, реализующий одну конкретную задачу управления или контроля.

В централизованной архитектуре используется одно высокопроизводительное вычислительное устройство, выполняющее сразу все функции системы, включая фоновое тестирование (рисунок 1). Это приводит к линейной зависимости полного времени тестирования от количества выполняемых функций, что при высокой рабочей (технологической) нагрузке может стать критичным для соответствия количественным требованиям безопасности. Интенсивность $\lambda_{\phi}^{оп}$ опасного накопления скрытых отказов в дублированных каналах системы, связанная с величиной полного цикла тестирования t_{ϕ} (плюс времени на восстановление работоспособности t_r) формулой $\lambda_{\phi}^{оп} = 2\lambda_{du}^2 (t_{\phi} + t_r)$,

с увеличением времени может выйти за допустимые нормы.

Распределённые архитектуры, напротив, используют множество маломощных устройств, параллельно обрабатывающих задачи и проводящих самотестирование (рисунок 2). Такой подход снижает нагрузку на отдельные компоненты, однако делает цикл полного тестирования зависящим от характеристик самого медленного элемента. Важно отметить, что в контексте данной статьи под распределённой архитектурой понимается не географически распределённая система, а архитектура, в рамках которой несколько физически и логически изолированных вычислительных устройств (микроконтроллеров) размещены в едином корпусе или стойке и функционируют параллельно, при этом каждая решает свою подзадачу. Следовательно, первостепенным является именно их аппаратная и программная изолированность.

Цель данной статьи – разработать обоснованный механизм выбора архитектуры функционально безопасных систем (централизованной или распределённой) на ранних этапах проектирования с учётом как эффективности фоновое тестирования, так и количественной оценки безопасности. Для достижения этой цели проведён сравнительный анализ обеих архитектур по следующим критериям: зависимость полного времени тестирования от числа функций, рабочей нагрузки и быстродействия элементной базы; влияние сложности программного обеспечения на интенсивность отказов; роль фактора общих причин. На основе полученных результатов сформулированы пороговые условия, при которых распределённая архитектура обеспечивает существенное преимущество в безопасности.

Начнём с централизованной системы, цикл её фоновое тестирования схематично представлен на рисунке 1. Основной акцент делается на том, что для завершения цикла системе необходимо протестировать все доступные ей ресурсы один за другим по очереди.

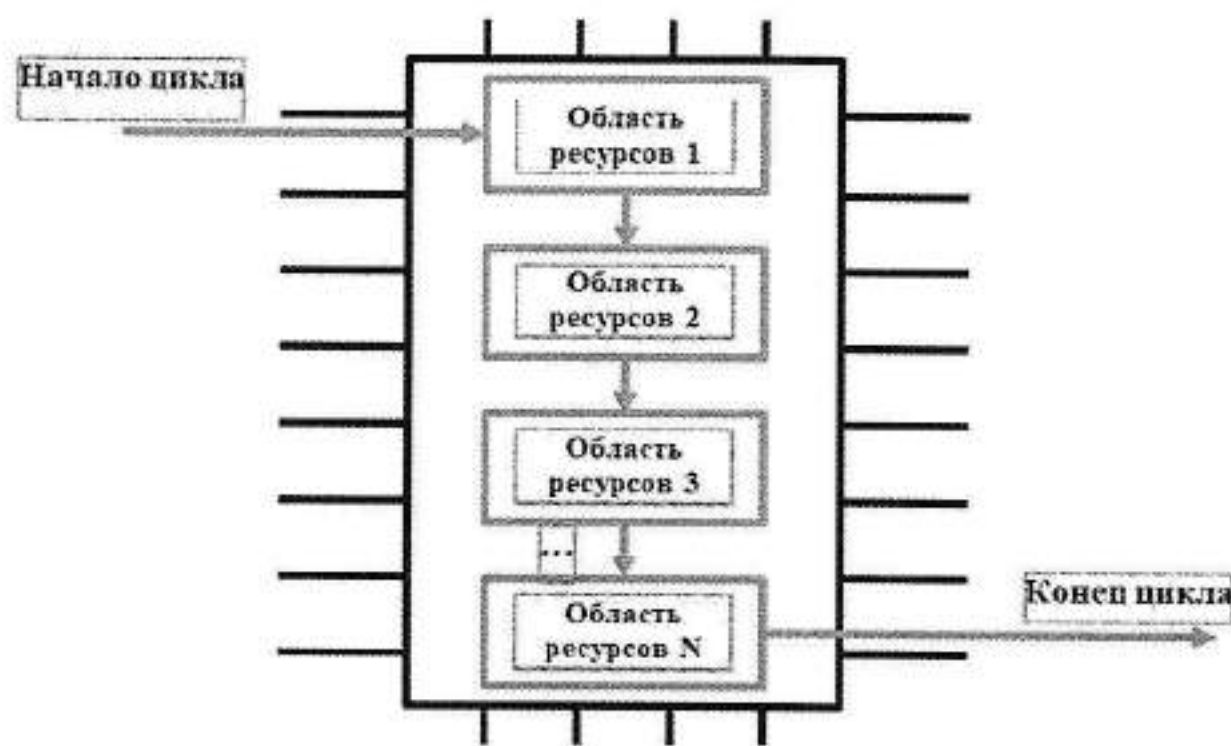


Рисунок 1 – Цикл фоновое тестирования централизованной системы

Особенности централизованной системы:

- используется одно высокопроизводительное вычислительное устройство (например, процессор архитектуры Эльбрус);
- тестирование всех ресурсов выполняется этим же устройством в периоды, свободные от основной технологической работы;
- время полного цикла тестирования растет линейно с увеличением объема тестируемых ресурсов;
- объём тестируемых ресурсов прямо пропорционален количеству реализуемых функций N , так как каждая функция требует выделения памяти, процессорного времени и других ресурсов.

Допустим, представленная модель предполагает последовательное выполнение функций и их тестирования, что является консервативной оценкой для централизованной архитектуры. Безусловно, современные многоядерные процессоры позволяют организовать параллельное выполнение. Однако необходимо учитывать, что:

- даже в многоядерных системах такие ресурсы, как общая память, шины и подсистема ввода-вывода, остаются общими, создавая «узкие места» и не позволяя добиться полного параллелизма;
- фоновое тестирование общих ресурсов (кэшей, межъядерных соединений, контроллеров памяти) является сложной задачей, которая часто требует временного приостановления работы других ядер, что снижает выигрыш от параллелизма;
- многоядерность не уменьшает, а скорее увеличивает фактор отказов по общей причине (β), так как ядра тесно связаны на аппаратном уровне.

Таким образом, хотя учёт параллелизма может улучшить количественные показатели централизованной архитектуры, но при этом серьезно осложнит анализ.

Рассмотрим продолжительность полного цикла тестирования для централизованной архитектуры.

Определение длительности времени тестирования за 1 рабочий цикл в централизованной системе примем по формуле

$$t_{\text{Ц.тест}} = S_{\text{Ц}} t_{\text{рабоч.цикл}}, \quad (1)$$

где $S_{\text{Ц}}$ – доля рабочего цикла, выделенная на фоновое тестирование в централизованной системе; $t_{\text{рабоч.цикл}}$ – длительность рабочего цикла системы.

При условии последовательного тестирования в централизованной системе получается, что общая длительность времени ($t_{\text{Ц.тест.набора}}$), необходимого на тестирование всех N функций без учета времени рабочей (технологической) нагрузки, определяется по формуле

$$t_{\text{Ц.тест.набора}} = \sum_{i=1}^N t_i, \quad (2)$$

где N – количество функций, выполняемых централизованной системой; t_i – время, необходимое для тестирования одной i -й функции.

Теперь, зная $t_{\text{Ц.тест.набора}}$ и $t_{\text{Ц.тест}}$ можно определить количество рабочих циклов централизованной системы, необходимых для тестирования всех N функций в централизованной системе с учётом времени рабочей (технологической) нагрузки:

$$Q_{\text{Ц.циклов}} = \frac{t_{\text{Ц.тест.набора}}}{t_{\text{Ц.тест}}} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{S_{\text{Ц}} t_{\text{рабоч.цикл}}}. \quad (3)$$

Таким образом, длительность времени полного цикла тестирования системы с централизованной архитектурой определяется следующим образом:

$$T_{\text{центр}} = t_{\text{рабоч.цикл}} Q_{\text{Ц.циклов}} = \frac{t_{\text{рабоч.цикл}}}{S_{\text{Ц}}} \sum_{i=1}^N t_i = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{S_{\text{Ц}}}. \quad (4)$$

Теперь рассмотрим распределённую систему, цикл её фоновое тестирования схематично представлен на рисунке 2. Основной акцент делается на том, что каждый вычислительный модуль является самостоятельной единицей и выполняет тестирование доступных ему ресурсов независимо от остальных.

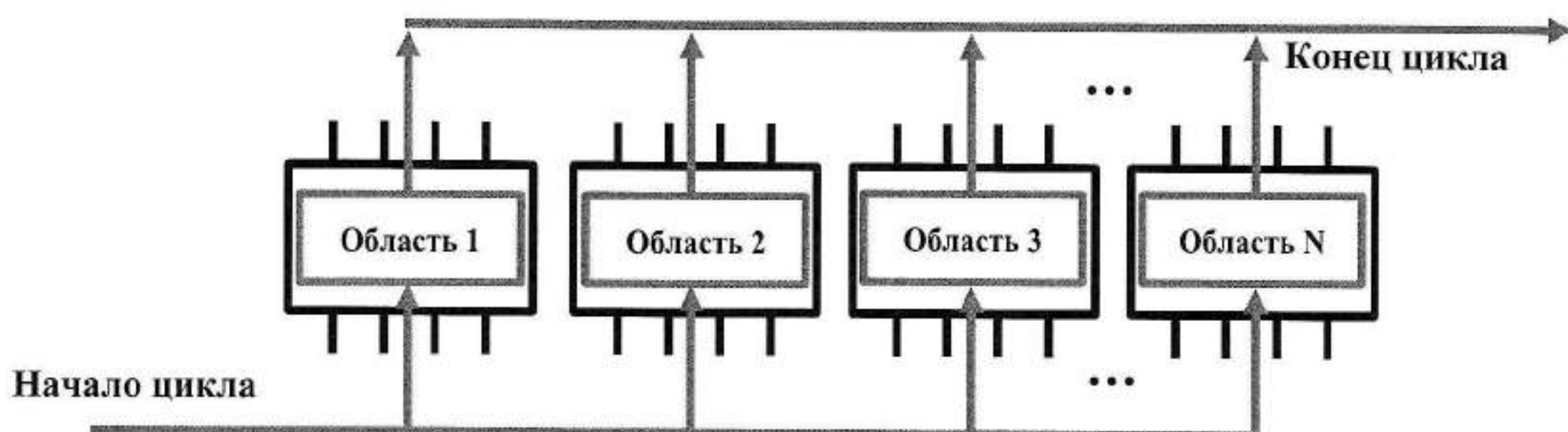


Рисунок 2 – Цикл фоновое тестирования распределённой системы

Особенности распределённой системы:

– используется множество специализированных маломощных устройств (например, микроконтроллеры Миландр);

– каждое устройство выполняет фоновое самотестирование параллельно с другими в периоды простоя от своей основной функции;

– время полного цикла тестирования всей системы определяется быстродействием самого медленного устройства (принцип «слабого звена»);

– общее число устройств равно количеству функций N (или пропорционально ему), при этом объём тестируемых ресурсов и сложность ПО на каждом отдельном устройстве остаются фиксированными и небольшими, независимо от общего N .

Рассмотрим продолжительность полного цикла тестирования для распределённой архитектуры.

Определение длительности времени тестирования $t_{P, \text{тест}}$ за 1 рабочий цикл в распределённой системе примем по формуле

$$t_{P, \text{тест}} = S_p t_{\text{рабоч. цикл}}, \quad (5)$$

где S_p – доля рабочего цикла одного устройства, выделенная на фоновое тестирование в распределённой системе; $t_{\text{рабоч. цикл}}$ – длительность рабочего цикла одного устройства системы.

Учитывая, что в распределённой системе тестирование отдельных элементов происходит параллельно, длительность времени $t_{P, \text{тест. набора}}$ полного тестирования всех N вычислительных устройств (функций) без учета времени рабочей (технологической) нагрузки определяется по формуле

$$t_{P, \text{тест. набора}} = \max_{1 \leq i \leq N} t_i, \quad (6)$$

где t_i – время, необходимое для тестирования одной i -й функции (устройства); N – количество функций (вычислительных устройств) в распределённой системе.

Зная $t_{P, \text{тест. набора}}$ и $t_{\text{тест}}$ количество рабочих циклов распределённой системы, необходимых для полного цикла тестирования, определяем по формуле

$$Q_{P, \text{циклов}} = \frac{t_{P, \text{тест. набора}}}{t_{P, \text{тест}}} = \frac{\max_{1 \leq i \leq N} t_i}{S_p t_{\text{рабоч. цикл}}}. \quad (7)$$

Таким образом, длительность времени $T_{\text{распр}}$ полного цикла тестирования системы с распределённой архитектурой определяется следующим образом:

$$T_{\text{распр}} = t_{\text{рабоч. цикл}} Q_{P, \text{циклов}} = \frac{t_{\text{рабоч. цикл}}}{S_p t_{\text{рабоч. цикл}}} \cdot \max_{1 \leq i \leq N} t_i = \frac{\max_{1 \leq i \leq N} t_i}{S_p}. \quad (8)$$

Теперь перейдём к сравнению продолжительности цикла фонового тестирования для рассматриваемых систем.

Рабочий цикл системы определяется как период времени от получения и начала обработки устройством входных данных до выдачи сформированного по ним технологического решения на объект контроля/управления. В течение данного времени система выполняет основные технологические функции (последовательное исполнение набора N функций для централизованной архитектуры и параллельное ис-

полнение набора N функций – одна функция одним из N устройств при распределённой архитектуре) и проводит фоновое тестирование (в свободное от исполнения технологических функций время). Длительность рабочего цикла $t_{\text{рабоч. цикл}}$ выбирается разработчиками системы с учетом специфики реализации взаимодействия с объектом управления/контроля. В рамках текущего анализа $t_{\text{рабоч. цикл}}$ принимается одинаковой для обеих архитектур систем и для всех устройств из состава распределённой архитектуры.

Для упрощения и приведения к единообразию формул (4) и (8) введём следующие обозначения:

$t_{\text{Ц. функ}} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N}$ – среднее время тестирования одной функции в централизованной системе; $t_{P, \text{функ}} = \max_{1 \leq i \leq N} t_i$ –

максимальное время тестирования одной функции в распределённой системе.

После подстановки введенных обозначений в формулы (4) и (8) и упрощения время полного тестирования для централизованной и распределённой системы определяется по формулам

$$T_{\text{центр}} = \frac{N t_{\text{Ц. функ}}}{S_{\text{Ц}}}; \quad (9)$$

$$T_{\text{распр}} = \frac{t_{P, \text{функ}}}{S_p}. \quad (10)$$

Из приведённого сравнения следует, что время тестирования централизованной системы $T_{\text{центр}}$ растёт пропорционально N , а время тестирования распределённой системы $T_{\text{распр}}$ от N не зависит. Это даёт преимущество распределённой архитектуре относительно этого показателя при масштабировании системы (увеличении числа N).

Однако на практике из-за различия производительности устройств (мощный процессор против простого микроконтроллера) время тестирования одной функции в каждой архитектуре несопоставимо. Для корректного сравнения вводится коэффициент k , который показывает, во сколько раз максимальное время тестирования одной функции в распределённой системе отличается от среднего времени тестирования функции в централизованной системе:

$$\max_{1 \leq i \leq N} t_i = k \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N}. \quad (11)$$

Здесь $k = 1$ соответствует равенству максимального времени тестирования функции в распределённой системе и среднего времени в централизованной. Это означает, что одна функция в централизованной системе тестируется в среднем столько же, сколько и самая длительная функция в распределённой системе; при $k < 1$ – распределённая быстрее, чем централизованная. Это означает, что, несмотря на повышенное быстродействие вычислительного устройства централизованной системы, фактор малого объёма тестируемых ресурсов и параллельность процессов в распределённой системе оказывает большее

влияние на снижение длительности тестирования; при $k > 1$ – распределенная медленнее, чем централизованная. Это означает, что за счет повышенного быстродействия вычислительного устройства централизованной системы тестирование одной функции происходит быстрее, чем в распределенной.

В дальнейшем рассматривается диапазон $0,5 \leq k \leq 1,5$ как наиболее реалистичный.

Для упрощения анализа представим, что выраже-

ние $\frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N} = 1$ (условная единица).

В результате упрощения формул (9) и (10), получим выражения времени полного тестирования для централизованной и распаренной системы, приведённые к единообразию:

$$T_{\text{центр}} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{S_{\text{Ц}}} = \frac{N}{S_{\text{Ц}}}; \quad (12)$$

$$T_{\text{распр}} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{S_{\text{P}}} = \frac{k}{S_{\text{P}}}. \quad (13)$$

Для сравнения продолжительности полного цикла тестирования и выявления параметрических зависимостей воспользуемся наглядным графическим методом. При построении графиков примем следующие допущения и ограничения.

1 Из-за малой производительности устройств распределенная система имеет мало времени на тестирование в одном рабочем цикле вне зависимости от количества функций (устройств). Поэтому всегда принимаем $S_{\text{P}} = 0,1$.

2 Для централизованной системы значение доли времени на тестирование $S_{\text{Ц}}$ является критическим параметром, который на практике сильно зависит от соотноше-

ния вычислительной мощности процессора и совокупной трудоемкости реализуемых функций. Поскольку в рамках данного исследования не производится привязка к конкретной аппаратной платформе и типу задач, для анализа выбраны три репрезентативных сценария, покрывающие широкий диапазон возможных состояний системы:

$S_{\text{Ц}} = 0,9$ – сценарий с низкой технологической нагрузкой, когда под тестирование выделяется большая доля рабочего цикла;

$S_{\text{Ц}} = 0,5$ – сбалансированный сценарий, при котором время на основные функции и тестирование распределено поровну;

$S_{\text{Ц}} = 0,1$ – сценарий с высокой технологической нагрузкой, когда для тестирования доступна лишь малая доля цикла.

Выбранные значения $S_{\text{Ц}} = 0,1; 0,5; 0,9$ можно рассматривать как нижнюю, среднюю и верхнюю границы реалистичного диапазона. Они позволяют провести укрупненную оценку и наглядно продемонстрировать, как изменение загруженности централизованного процессора влияет на длительность полного цикла тестирования. Для более точного анализа при наличии конкретной системы рекомендуется использовать индивидуальное значение $S_{\text{Ц}}$, полученное на основе параметров целевой платформы и требований к функциям.

3 Для графика распределенной системы минимальное значение (нижняя граница) $k = 0,5$, а максимальное значение $k = 1,5$ (верхняя граница). При демонстрации принятия решения с использованием графика в качестве основного возьмём график распределенной системы, соответствующий $k = 1$.

4 Полное время тестирования измеряется в количестве рабочих циклов.

Используя формулы (12) и (13), построим графики продолжительности полного цикла тестирования, в зависимости от количества реализованных в системе функций (рисунок 3).



Рисунок 3 – Графический анализ зависимости длительности тестирования систем

Напомним, что минимизация времени полного тестирования является одним из факторов, который следует учитывать при проектировании безопасной системы. Чем ниже значение, тем более оперативно происходит обнаружение скрытых отказов. Поэтому предпочтение отдаётся архитектуре с более низким (по оси Y) значением для конкретного числа функций. Таким образом, если максимальное время тестирования одной функции в распределённой системе сопоставимо со средним временем в централизованной ($k \approx 1$), тогда:

- если тестирование занимает 10 % рабочего цикла $S_{Ц} = 0,1$, то при одной функции архитектуры равнозначны, а при наращивании функций распределённая архитектура становится предпочтительнее;

- если тестирование занимает 50 % рабочего цикла, то до 5 функций предпочтение отдается централизованной архитектуре, а при наращивании функций распределённая архитектура становится предпочтительнее;

- если тестирование занимает 90 % рабочего цикла, то до 9 функций предпочтение отдаётся централизованной архитектуре, а при наращивании функций распределённая архитектура становится предпочтительнее.

Исходя из графического анализа можно сделать вывод, что при малом числе функций ($N \leq 5 \sim 9$) и высокой доле времени на тестирование ($S_{Ц} \geq 0,5$) централизованная архитектура обеспечивает более короткий цикл тестирования. Однако при $N > 10$ преимущество переходит к распределённой архитектуре, время тестирования которой не зависит от количества функций. Максимальное количество функций, при котором использование централизованной системы имеет преимущество, составляет $N = 13$ (при $S_{Ц} = 0,1$ и $k = 1,5$).

При проектировании ответственных систем основным количественным показателем функциональной безопасности является вероятность опасного отказа в час (PFH – Probability of Dangerous Failure per Hour). Этот параметр характеризует частоту, с которой система может перейти в опасное состояние, и служит основой для определения требуемого уровня полноты безопасности (УПБ) согласно стандартам.

Проведём сравнительный анализ безопасности двух рассматриваемых архитектур с использованием методологии, соответствующей стандартам ГОСТ Р МЭК 61508 и ГОСТ Р МЭК 61511. Анализ выполняется в два этапа.

Базовый анализ – с учётом только аппаратных характеристик и длительности цикла тестирования. Это позволяет выделить и определить влияние архитектурных решений.

Расширенный анализ – с дополнительным учётом влияния сложности программного обеспечения, который, как будет показано, является решающим фактором в современных системах.

Математическая модель расчёта PFH

Для оценки безопасности дублированных систем используется показатель PFH . Согласно стандарту ГОСТ Р МЭК 61508, для двухканальной системы с архитектурой 1oo2 (система считается отказавшей только при отказе обоих каналов одной функции) вероятность опасного отказа рассчитывается по формуле

$$PFH_{1oo2} \approx 2((1-\beta)\lambda_{du})^2 t_{ce} + \beta\lambda_{du}, \quad (14)$$

где λ_{du} – интенсивность опасных необнаруженных отказов одного канала $1/\text{ч}^{-1}$; β – фактор общих причин, отражающий долю отказов, одновременно выводящих из строя оба канала (рекомендуемые значения: 0,01–0,1); t_{ce} – среднее время восстановления, ч, т. е. среднее время, в течение которого система находится в неработоспособном состоянии после первого отказа до его обнаружения и восстановления. Для систем с периодическим тестированием принимается

$$t_{ce} \approx \frac{T_{\text{тест}}}{2}, \quad (15)$$

где $T_{\text{тест}}$ – длительность полного цикла тестирования.

Следует отметить, что в представленной модели время восстановления работоспособности t_r (время на переключение на резерв, перезапуск и т. д.) явно не выделяется и считается включённым в общее время восстановления t_{ce} . В рамках данного сравнительного анализа мы принимаем, что t_r является величиной одного порядка для обеих архитектур и не оказывает решающего влияния на их сравнительное преимущество. Это допущение сделано для упрощения модели и концентрации на анализе длительности цикла тестирования и влияния программного обеспечения. Для систем, где время реакции критично, данный параметр должен быть учтён в уточнённой модели.

Формула (14) учитывает два основных механизма опасного отказа:

- независимые отказы в обоих каналах (первое слагаемое);

- отказы по общей причине (второе слагаемое).

Важно отметить, что даже в рамках базового (аппаратного) анализа распределённая архитектура обладает потенциальным преимуществом, не отражённым в текущей модели, – снижение риска отказов по общей причине. Физическая изолированность узлов, отдельные цепи питания, отсутствие единой операционной системы и межпроцессного взаимодействия значительно уменьшают вероятность того, что один внешний фактор (например, скачок напряжения, электромагнитная помеха или ошибка в драйвере) одновременно выведет из строя несколько каналов. Это позволяет предположить, что в реальных условиях значение фактора β для распределённой системы может быть существенно ниже, чем для централизованной, что дополнительно снижает её PFH и повышает безопасность.

Выбор значения фактора β общих причин

Для централизованной системы, характеризующейся наличием единой операционной системы, общих ресурсов (память, шины, драйверы) и высокой сложностью ПО, вероятность отказов по общей причине существенно возрастает. Внешние воздействия (скачки напряжения, ЭМП, ошибки в ОСРВ, конфликты задач) затрагивают всю систему целиком. Согласно методикам стандарта МЭК 61508-6 и эмпирическим данным по отказам встраиваемых систем на базе ОСРВ для таких архитектур обоснованно использовать $\beta_{\text{центр}} = 0,1$.

Для распределённой системы, где каждая функция реализована на физически изолированном устройстве

с минималистичным ПО без ОС, сведены к минимуму точки отказа. Внешние воздействия, как правило, локализованы и затрагивают только отдельные узлы. Это позволяет снизить фактор общих причин до $\beta_{распр} = 0,1$, что соответствует практике применения микроконтроллерных систем в критически важных отраслях (например, в железнодорожной автоматике или АСУ ТП).

Расчёт PFH для централизованной архитектуры

В централизованной системе все функции выполняются на едином высокопроизводительном устройстве (микропроцессоре). Среднее время восстановления

$$t_{се}^{центр} = \frac{T_{центр}}{2} = \frac{N}{2S_C}, \quad (16)$$

где N – количество функций; S_C – доля рабочего цикла выделяемая, на тестирование.

Тогда, (вероятность опасного отказа в час для централизованной системы)

$$\begin{aligned} PFH_{центр} &= 2 \left((1 - \beta_{центр}) \lambda_{ду}^{центр} \right)^2 \frac{N}{2S_C} + \beta_{центр} \lambda_{ду}^{центр} = \\ &= (1 - \beta_{центр})^2 \left(\lambda_{ду}^{центр} \right)^2 \frac{N}{S_C} + \beta_{центр} \lambda_{ду}^{центр}. \end{aligned} \quad (17)$$

Расчёт PFH для распределённой архитектуры

В распределенной системе каждая функция выполняется на отдельном устройстве (микроконтроллере). Среднее время восстановления

$$t_{се}^{распр} = \frac{T_{распр}}{2} = \frac{k}{2S_R}, \quad (18)$$

где k – коэффициент скорости тестирования одной функции (учитывает разницу в быстродействии микроконтроллера и микропроцессора); S_R – доля рабочего цикла, выделяемая на тестирование в распределённой системе.

В распределённой системе каждый из N каналов (устройств) работает независимо, но система в целом считается отказавшей, если отказали оба канала в рамках одной функции (предполагается дублирование на уровне функций). Таким образом, общая интенсивность опасных необнаруживаемых отказов системы пропорциональна N , поскольку каждый канал функции вносит свой вклад в риск.

Следовательно, PFH для распределенной системы

$$\begin{aligned} PFH_{распр} &= N \left[2 \left((1 - \beta_{распр}) \lambda_{ду}^{распр} \right)^2 \frac{k}{2S_R} + \beta_{распр} \lambda_{ду}^{распр} \right] = \\ &= N \left[(1 - \beta_{распр})^2 \left(\lambda_{ду}^{распр} \right)^2 \frac{k}{S_R} + \beta_{распр} \lambda_{ду}^{распр} \right]. \end{aligned} \quad (19)$$

Примечание – В данной модели предполагается, что отказ (по обоим каналам) любой из N функций приводит к опасному отказу всей системы. Это соответствует сценарию, где все функции являются критически важными для безопасности.

Критерий выбора архитектуры по показателю PFH

Рассмотрим соотношение показателя безопасности централизованной архитектуры и распределённой архитектуры. Это соотношение может выступать в качестве критерия для выбора архитектуры на основе показателя PFH , так как оно наглядно показывает, какая из них безопаснее.

$$\frac{PFH_{центр}}{PFH_{распр}} = \frac{(1 - \beta_{центр})^2 \left(\lambda_{ду}^{центр} \right)^2 \frac{N}{S_C} + \beta_{центр} \lambda_{ду}^{центр}}{N \left[(1 - \beta_{распр})^2 \left(\lambda_{ду}^{распр} \right)^2 \frac{k}{S_R} + \beta_{распр} \lambda_{ду}^{распр} \right]}. \quad (20)$$

При равных $\lambda_{ду}^{центр} = \lambda_{ду}^{распр} = \lambda_{ду}$ критерий упрощается до:

$$\frac{PFH_{центр}}{PFH_{распр}} = \frac{(1 - \beta_{центр})^2 \lambda_{ду} \frac{N}{S_C} + \beta_{центр}}{N (1 - \beta_{распр})^2 \lambda_{ду} \frac{k}{S_R} + N \beta_{распр}}. \quad (21)$$

Интерпретация:

$$\text{Если } \frac{(1 - \beta_{центр})^2 \lambda_{ду} \frac{N}{S_C} + \beta_{центр}}{N (1 - \beta_{распр})^2 \lambda_{ду} \frac{k}{S_R} + N \beta_{распр}} < 1,$$

то $PFH_{центр} < PFH_{распр}$ – централизованная архитектура безопаснее.

$$\text{Если } \frac{(1 - \beta_{центр})^2 \lambda_{ду} \frac{N}{S_C} + \beta_{центр}}{N (1 - \beta_{распр})^2 \lambda_{ду} \frac{k}{S_R} + N \beta_{распр}} > 1,$$

то $PFH_{центр} > PFH_{распр}$ – распределённая архитектура безопаснее.

Данный критерий справедлив *только* при условии равенства $\lambda_{ду}^{центр}$ и $\lambda_{ду}^{распр}$ для обеих архитектур, что является упрощением.

Графическое сравнение безопасности архитектур без учета влияния ПО

Из опыта известно, что микроконтроллеры часто надежнее микропроцессоров. Это связано с их более простой конструкцией. Однако для упрощения базового сравнения архитектур примем следующие допущения:

– интенсивности опасных необнаруживаемых отказов равны: $\lambda_{ду}^{центр} = \lambda_{ду}^{распр} = \lambda_{ду} = 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$.

– фактор общих причин для централизованной архитектуры примем $\beta_{центр} = 0,1$, а для распределенной соответственно $\beta_{распр} = 0,01$;

– S_C – доля времени на тестирование в централизованной системе варьируется: $[0,1; 0,5; 0,9]$;

– $S_R = 0,1$ – фиксированная доля времени на тестирование в распределённой системе;

– k – коэффициент варьируется: $[0,5; 1,0; 1,5]$.

Подставляя значения в формулы (16) и (18), можно построить графики зависимости PFH от количества функций N .

На рисунке 4 представлено сравнение PFH в зависимости от N (количества функций) и при вариации параметров S_C и k .

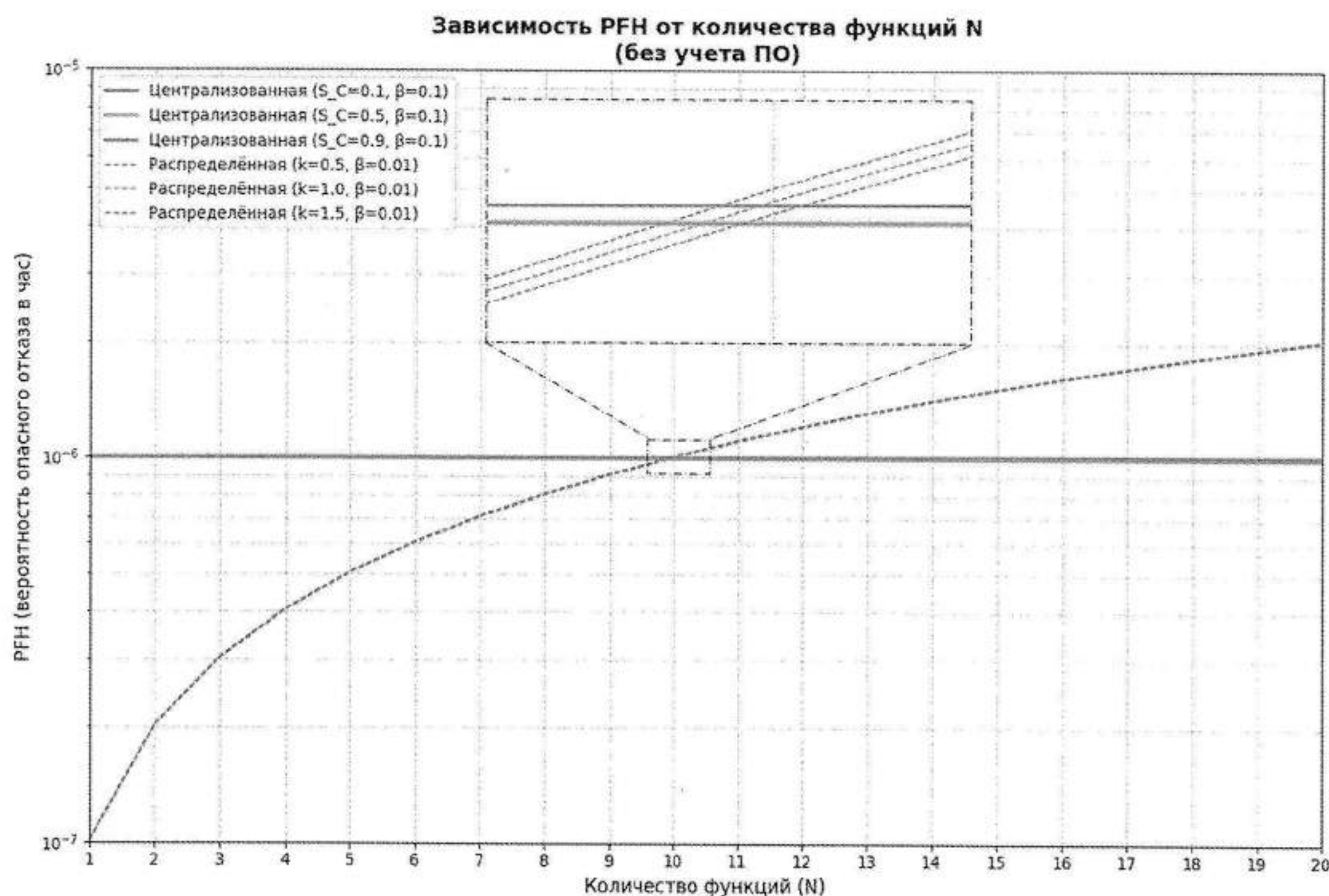


Рисунок 4 – Сравнение безопасности архитектур без учёта влияния программного обеспечения

На рисунке 4 представлено сравнение показателя *PFH* для централизованной и распределённой архитектур при различных значениях доли времени на тестирование S_C и коэффициента скорости тестирования k , без учёта влияния программного обеспечения.

Централизованная система (сплошные красная, желтая, зеленая линии) демонстрирует *практически неизменный уровень PFH* на промежутке от 0 до 20 при увеличении числа функций N . Это связано с тем, что доминирующим слагаемым в формуле (17) является $\beta_{\text{центр}} \lambda_{du}$, которое не зависит от N . Первое слагаемое $(1-\beta)^2 \lambda_{du}^2 \frac{N}{S_C}$ растёт линейно, но его вклад мал (порядка $10^{-8} \cdot \frac{N}{S_C}$), поэтому график имеет практически горизонтальный характер.

Распределённая система (пунктирные синяя, фиолетовая, коричневая линии) показывает *значительный рост PFH с увеличением N*, поскольку её риск пропорционален количеству функций (формула (19)). При этом наклон линий зависит от коэффициента k : чем выше k , тем больше значение *PFH*.

Все три линии распределённой системы пересекаются с линиями централизованной системы в районе $N \approx 10$. Например, это означает, что *при малых N* (до 10) распределённая архитектура обеспечивает более высокую безопасность (меньший *PFH*). Однако с ростом числа функций ($N > 10$) её преимущество сокращается, и централизованная архитектура, демонстрирующая стабильно низкий *PFH*, не зависящий от N , становится предпочтительнее в рамках данной модели, не учитывающей ПО.

Важное замечание о ограничениях математической модели и корректности выводов

В представленной математической модели было использовано усреднённое значение $\lambda_{du} = 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$ для обеих архитектур. Это упрощение необходимо для более явного выделения влияния архитектурных особенностей на показатель *PFH*. Однако оно не отражает реальной разницы в надёжности компонентов. Микроконтроллеры обычно имеют меньшую интенсивность отказов из-за конструктивной простоты, а микропроцессоры – большую, из-за их сложности.

Более того, и это является основным ограничением данной модели, анализ полностью игнорирует влияние программного обеспечения (ПО). В современных встраиваемых системах, особенно при росте числа функций N , вклад ошибок ПО в общий риск λ_{du} часто превышает вклад аппаратных отказов. Пренебрежение этим фактором может привести к кардинально неверным выводам при выборе архитектуры. Далее будет продемонстрировано, как учет влияния ошибок ПО меняет баланс преимуществ в пользу распределённой архитектуры даже при большом количестве функций.

Учет влияния программного обеспечения на безопасность

В реальных системах интенсивность опасных обнаруживаемых отказов λ_{du} определяется не только аппаратными компонентами, но и программным обеспечением (ПО). Ошибки в ПО (логические, алгоритмические, связанные с управлением памятью или синхронизацией) могут приводить к опасным отказам, особенно если тестирование не покрывает все сценарии поведения системы.

Суммарная интенсивность опасных обнаруживаемых отказов

$$\lambda_{du}^{\text{сумм}} = \lambda_{du}^{\text{апп}} + \lambda_{du}^{\text{ПО}}, \quad (22)$$

где λ_{du}^{app} – интенсивность опасных необнаруживаемых отказов аппаратной части; $\lambda_{du}^{ПО}$ – интенсивность опасных необнаруживаемых отказов, вызванных ошибками программного обеспечения.

Для количественной оценки влияния ПО на безопасность в данной работе используется методология, основанная на модели Джелинского – Моранды [2]. Эта модель связывает интенсивность отказов программного обеспечения с его объёмом и сложностью, предполагая, что ошибки вносятся в процессе разработки и обнаруживаются (или проявляются) в процессе эксплуатации.

На основе данной методологии в работе [3] были получены обобщенные статистические зависимости, позволяющие оценить $\lambda_{du}^{ПО}$ для различных типов программных комплексов. Эти данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость интенсивности отказов от объёма ПО

Тип управляющего ПО	Размер процессора	Объём ПО, Мб	$\lambda \cdot 10^{-6}, \text{ч}^{-1}$
Элементарная управляющая программа	С	0,25–1	0,4
Базовая управляющая программа	С	1,4–4,0	1,5
Расширенная управляющая программа	С	4,0–16	6
Базовая операционная программа	С	16–64	25
Расширенная ОС	С	64–256	100
Управляющая программа	С	4–16	25
ОС с малыми возможностями	М/С	16–64	25
Универсальная ОС	С/Б	256+	100

Из таблицы 1 видно, что с ростом объёма программного обеспечения интенсивность отказов увеличивается экспоненциально. Например, при переходе от элементарной управляющей программы (0,25–1 Мб) к расширенной операционной системе (64–256 Мб) интенсивность отказов возрастает более чем в 250 раз.

В централизованной системе из-за того, что все функции реализуются в едином программном комплексе, объём ПО может достигать десятков или сотен мегабайт, особенно при большом числе функций N . Это соответствует категории «расширенная операционная система».

В распределённой архитектуре каждое устройство выполняет одну или несколько простых функций, и объём ПО на каждом микроконтроллере обычно составляет от 0,25 до 4 Мб, что соответствует уровню «элементарной» или «базовой» управляющей программы. При этом отсутствие ОСРВ позволяет значительно снизить вероятность ошибок, связанных с конкуренцией за ресурсы, блокировками, переполнением стека и другими проблемами, характерными для многозадачных сред.

Особенности ПО централизованной системы:

- использует мощный процессор с операционной системой реального времени (ОСРВ), драйверами, планировщиком задач и механизмами межпроцессного взаимодействия;

- все N функций реализованы в рамках единого программного комплекса;

- объём и сложность ПО растут нелинейно с увеличением количества функций N (из-за необходимости обеспечения взаимодействия, синхронизации, управления памятью). Для анализа возьмём диапазон (64–256 Мб), что соответствует категории «расширенная операционная система» (см. таблицу 1);

- наличие ОСРВ драйверов, планировщика задач, межпроцессного взаимодействия существенно увеличивает вероятность скрытых ошибок;

- увеличение N ведёт к экспоненциальному росту сложности ПО и, как следствие, к росту $\lambda_{du}^{ПО}$.

Для анализа возьмём $\lambda_{du}^{ПО} = 100 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ (см. таблицу 1).

Особенности ПО распределённой системы:

- каждый микроконтроллер выполняет одну (или несколько простых) функций;

- программное обеспечение максимально упрощено, чаще без ОСРВ или с использованием сверхлегкого планировщика;

- объём ПО на каждом узле фиксирован и не зависит от N общего числа функций. Для анализа возьмём диапазон (0,25–4 Мб)), что соответствует категории «базовая управляющая программа» (см. таблицу 1);

- ошибки изолированы в пределах одного узла, что снижает общий системный риск и повышает предсказуемость поведения системы. Для анализа возьмём $\lambda_{du}^{ПО} = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ (см. таблицу 1).

Модель расчёта PFH с учётом вклада программных ошибок

Для расчёта PFH с учетом вклада программных ошибок проведём уточнение интенсивности опасных необнаруживаемых отказов для централизованной и для распределённой системы в соответствии с формулой (22).

С учётом данных таблицы 1 полные интенсивности опасных необнаруживаемых отказов для каждой архитектуры определяются следующим образом.

Для централизованной системы (единое сложное ПО)

$$\lambda_{du}^{центр} = \lambda_{du}^{app} + \lambda_{du}^{ПОцентр} = 1 \cdot 10^{-5} + 100 \cdot 10^{-6} = 1,1 \cdot 10^{-4}. \quad (23)$$

Для распределённой системы (множество простых ПО)

$$\lambda_{du}^{распр} = \lambda_{du}^{app} + \lambda_{du}^{ПОраспр} = 1 \cdot 10^{-5} + 1,5 \cdot 10^{-6} = 1,15 \cdot 10^{-5}. \quad (24)$$

Из приведённых расчетов следует, что учет ошибок ПО для централизованной системы увеличивает $\lambda_{du}^{центр}$ в 11 раз, в то время как для распределённой – $\lambda_{du}^{распр}$ увеличивается лишь на 15 %. Это наглядно демонстрирует отличие архитектур.

Подставим выражения (23) и (24) в формулу PFH для архитектуры 1oo2:

$$\begin{aligned}
 PFH_{\text{центр}} &= (1 - \beta_{\text{центр}})^2 (\lambda_{du}^{\text{центр}})^2 \frac{N}{S_C} + \beta_{\text{центр}} \lambda_{du}^{\text{центр}} = \\
 &= (1 - 0,1)^2 (1,1 \cdot 10^{-4})^2 \frac{N}{S_C} + 0,1 \cdot 1,1 \cdot 10^{-4} = \\
 &= 9,801 \cdot 10^{-9} \frac{N}{S_C} + 1,1 \cdot 10^{-5}; \quad (25)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 PFH_{\text{распр}} &= N \left[(1 - \beta_{\text{распр}})^2 \cdot (\lambda_{du}^{\text{распр}})^2 \frac{k}{S_R} + \beta_{\text{распр}} \lambda_{du}^{\text{распр}} \right] = \\
 &= N \left[(1 - 0,01)^2 (1,15 \cdot 10^{-5})^2 \frac{k}{S_R} + 0,01 \cdot 1,15 \cdot 10^{-5} \right] = \\
 &= N \left(1,296 \cdot 10^{-10} \frac{k}{S_R} + 1,15 \cdot 10^{-7} \right). \quad (26)
 \end{aligned}$$

Построим графики (рисунок 5).

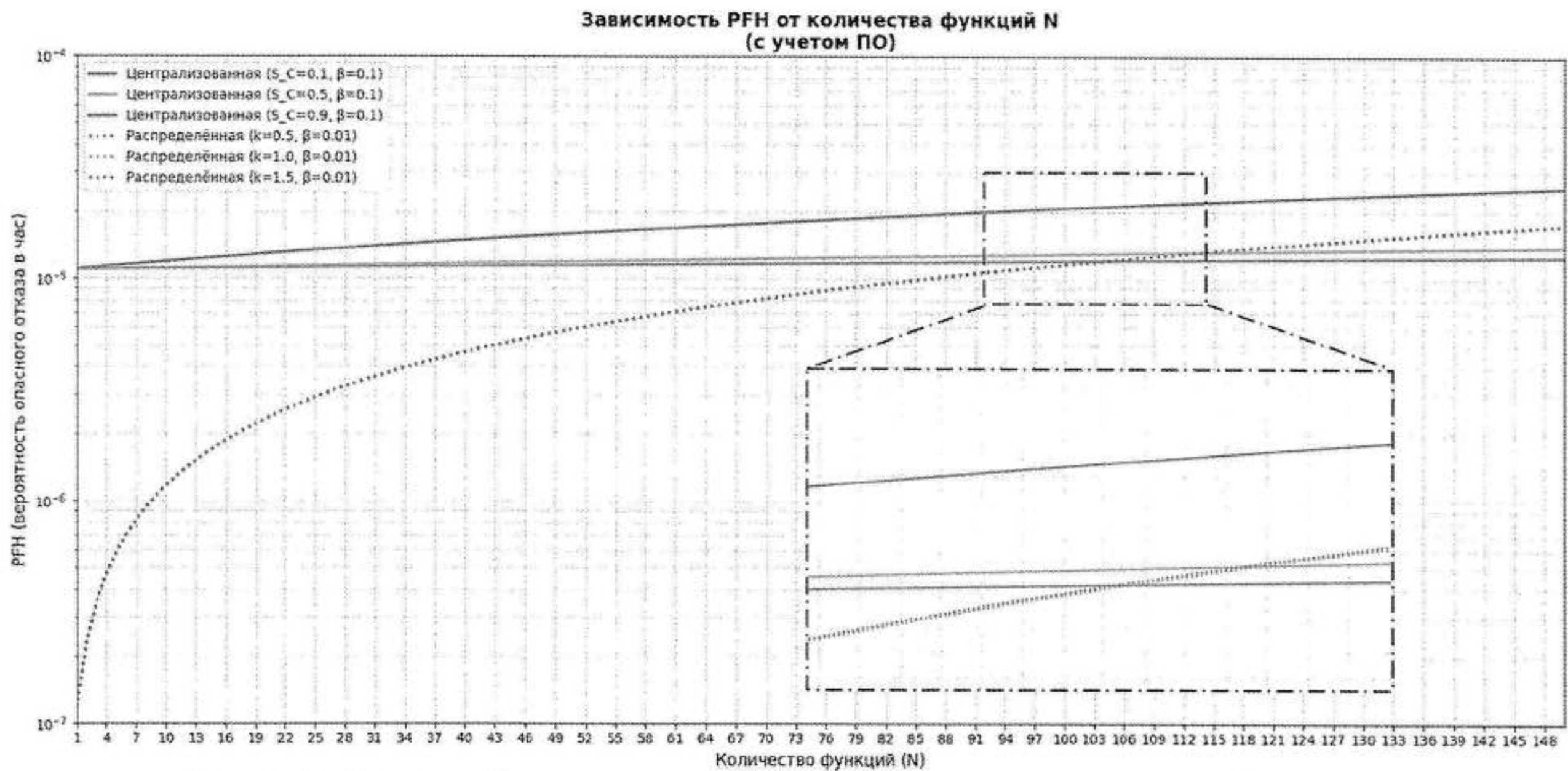


Рисунок 5 – Сравнение безопасности архитектур с учётом влияния программного обеспечения

На рисунке 5 показаны графики PFH при учёте влияния ошибок программного обеспечения. Здесь разница между архитектурами становится уже значительной.

Централизованная система (сплошные красная, желтая, зеленая линии) имеет *значительно более высокий базовый уровень PFH* из-за большого вклада ПО ($\lambda_{du}^{\text{центр}} = 1,1 \cdot 10^{-4}$). Различия между графиками при $S_C = 0,1$ (красная линия) и при $S_C = 0,9$ (зелёная линия) становятся очевидными.

Красный график демонстрирует более сильный рост PFH .

Распределённая система (пунктирные синяя, фиолетовая, коричневая линии) начинается с очень низкого уровня PFH (порядка 10^{-7} при $N = 1$) и растёт до тех пор, пока не пересекается с графиками централизованной системы в районе $N > 100$.

Анализ графиков показывает, что пересечения происходят на гораздо больших значениях N . Графики распределённой системы пересекают централизованную с $S_C = 0,9$ (зеленая линия) при $N \approx 104$; $S_C = 0,5$ (оранжевая линия) при $N \approx 114$, а с $S_C = 0,1$ (красная линия) **пересечение в выбранном диапазоне до $N = 150$ не наблюдается**, и, вероятно, произойдёт только при $N \gg 150$.

Заключение. В настоящей работе проведён сравнительный анализ централизованной и распределённой архитектур функционально безопасных систем с

точки зрения эффективности фоновое тестирования и количественной оценки безопасности (показатель PFH). Установлено, что хотя при малом числе функций ($N \leq 10$) централизованная архитектура может обеспечивать более короткий цикл тестирования, её безопасность оказывается существенно ниже при учёте влияния программного обеспечения и фактора отказов по общим причинам.

Важным результатом исследования является демонстрация доминирующей роли сложности программного обеспечения в формировании риска опасных отказов. В системах с высокими требованиями к функциональной безопасности, таких как железнодорожная автоматика, промышленные АСУ ТП, предпочтение следует отдавать распределённой архитектуре на базе специализированных микроконтроллеров (например, Миландр), поскольку она обеспечивает изоляцию ошибок, минимизацию объёма ПО на узел и снижение вероятности отказов по общей причине.

Однако несмотря на продемонстрированные преимущества в функциональной безопасности (PFH), распределённая архитектура имеет и существенный недостаток – более низкую общую надежность (Availability). Это напрямую следует из теории надежности: система, состоящая из N последовательно соединенных с точки зрения общей работоспособности элементов, имеет общую интенсивность отказов, равную сумме интенсивностей отказов ее компонентов.

Поскольку распределенная система содержит больше аппаратных компонентов (микроконтроллеров, блоков питания, разъемов), вероятность того, что хотя бы один из них откажет (приведя к простоям всей системы или ее части), выше, чем в централизованной системе.

Таким образом, выбор архитектуры представляет собой классический компромисс: распределенная архитектура предлагает высокую функциональную безопасность (меньшая вероятность опасного отказа), в то время как централизованная может обеспечить более высокую общую надежность (меньшая вероятность полного простоя). В системах, где требования к безопасности менее критичны и доминируют экономические ограничения (стоимость аппаратуры, сложность интеграции и сопровождения), централизованная архитектура на базе высокопроизводительных процессоров может быть целесообразной.

Следовательно, выбор архитектуры на ранних этапах проектирования должен основываться на комплексной оценке, учитывающей не только производи-

тельность и время тестирования, но и приоритеты проекта в отношении функциональной безопасности, а также общей надежности и экономической эффективности.

Список литературы

1 Розенберг Е. Н. О влиянии полноты диагностирования на показатели функциональной безопасности / Е. Н. Розенберг, Н. Г. Пенькова // Интеллектуальные транспортные системы : материалы II Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 25 мая 2023 г. – М. : РУТ (МИИТ), 2023. – С. 631–636.

2 Al turk L. Jelinski-Moranda Software Reliability Growth Model : A Brief Literature and Modification / L. Al turk, E. Alsolami // International Journal of Software Engineering & Applications. 2016. – Vol. 7. – P. 33–44. – DOI: 10.5121/ijsea.2016.7204.

3 Предложение по определению эксплуатационной надежности программного обеспечения сложных технических систем / А. С. Белов, М. М. Добрышин, А. Н. Горшков, Д. Е. Шугуров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 9. – С. 143–148. – DOI: 10.24412/2071-6168-2022-9-143-148.

Получено 05.09.2025

E. N. Rozenberg, N. G. Penkova, S. V. Ipatov, K. A. Bochkov. Analysis of methods for constructing functionally safe structures using elements of varying complexity.

This paper presents a comparative analysis of centralized and distributed architectures for functionally safe systems, considering both the efficiency of background testing and quantitative safety assessment based on the Probability of Dangerous Failure per Hour (PFH). The study examines the influence of the number of implemented functions, software complexity, and the common cause failure (CCF) factor on diagnostic cycle duration and functional safety integrity. It is shown that while centralized architectures can offer shorter test cycles for a small number of functions, distributed architectures provide significant safety advantages when software-related risks are considered. These advantages stem from physical and logical isolation of components, reduced software size and complexity per node, and a lower likelihood of common cause failures. Based on the analysis, practical criteria for selecting an appropriate architecture at the early design stages are proposed.

УДК 621.372.011.7: 656.25(075.8)

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

ЗАДАЧИ ПО ПЕРЕХОДНЫМ ПРОЦЕССАМ В КУРСЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ ДЛЯ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО СИГНАЛИЗАЦИИ, ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ И БЛОКИРОВКЕ

Рассматриваются отдельные задачи по переходным процессам, которые возникают при анализе работы электромагнитных реле. Эти задачи имеют теоретический интерес. Также их содержание связано с актуальными практическими вопросами для систем железнодорожной автоматики и телемеханики. Проанализированы особенности расчета переходных процессов в схемах «земля Максвелла» и «схема Гульстада». Методом кусочно-линейной аппроксимации решена задача о переходных процессах в катушке реле при движении якоря. Показано, что включение этих задач в курс теоретических основ электротехники служит целям практико-ориентированного обучения.

Введение. Несмотря на широкое внедрение микроэлектронной и микропроцессорной аппаратуры, электромагнитные реле первого класса надежности продолжают использоваться в системах железнодорожной автоматики и телемеханики [1, 2]. Современные релейно-процессорные электрические централизации не уступают по функциональности микропроцессорным [3]. Даже если электромагнитные реле не найдут применения в перспективных системах интервального регулирования движения поездов [4], то миниатюрные реле-герконы сохранят свое место в аппаратуре управления электроснабжением железной дороги [5, 6].

Переключение электромагнитных реле, обладающих существенной индуктивностью, сопровождается переходными процессами [7]. Поэтому соответствующий раздел теории электрических цепей имеет важное практическое значение для специалистов в области железнодорожной автоматики и телемеханики. Кроме того, теория переходных процессов находит широкое применение при решении задач электромагнитной совместимости [8]. Проблематика электромагнитной совместимости крайне актуальна в современных условиях из-за увеличившейся чувствительности микроэлектронной элементной базы и ухудшившейся электромагнитной обстановки [9]. Из этого следует, во-первых, необходимость основательного изучения переходных процессов студентами соответствующей специальности транспортных вузов. Во-вторых, необходима адаптация содержания учебного материала к потребностям специальности.

В статье рассматриваются отдельные задачи по переходным процессам, которые представляют интерес для анализа работы электромагнитных реле и могут использоваться в учебном процессе, так как имеют не только узкопрактический (работа реле), но и теоретический и методический интерес. Такие задачи рассмотрены в [7]. Указанный источник является библиографической редкостью и требует дополнений в некоторых аспектах.

Основная часть.

Для анализа работы реле представляет интерес схема, называемая «земля Максвелла» (рисунок 1). Расчет переходных процессов в ней представлен в [7, 10].

Он выполнен классическим методом расчета переходных процессов.

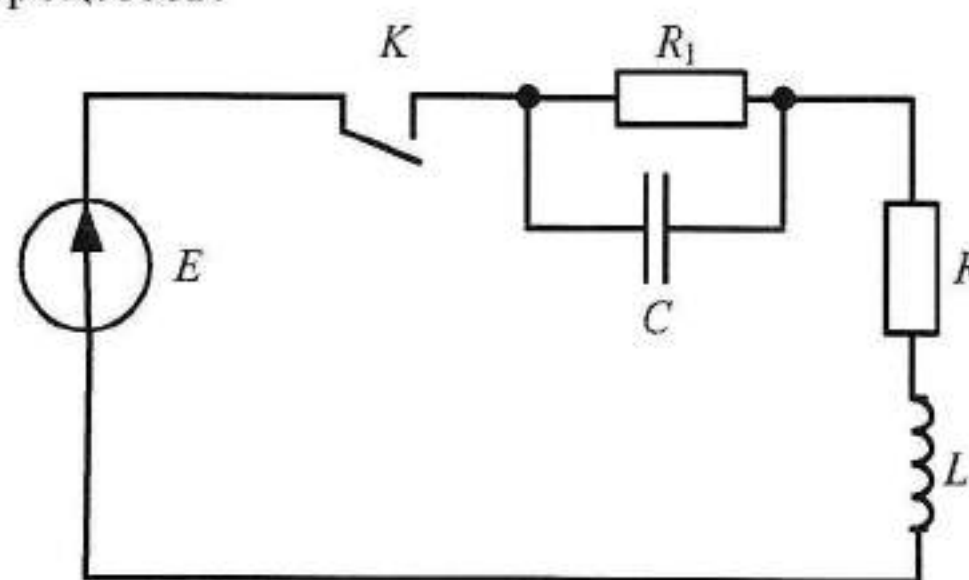


Рисунок 1 – Схема «земля Максвелла»

Но для подготовки специалистов СЦБ целесообразно провести анализ влияния емкости конденсатора C на переходные процессы в аperiodическом режиме. Для этого выражение для тока в катушке преобразуется к виду [7]

$$i(t) = I \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + i_m, \quad (1)$$

$$i_m = I \left[e^{-\frac{t}{\tau}} + e^{-bt} \left(\frac{R_1 + R - Lb}{\sqrt{b^2 - \omega_0^2}} \operatorname{sh} \sqrt{b^2 - \omega_0^2} t - \operatorname{ch} \sqrt{b^2 - \omega_0^2} t \right) \right],$$

$$I = \frac{E}{R + R_1}, \quad \tau = \frac{L}{R + R_1}, \quad b = \frac{L + CRR_1}{2LCR_1},$$

$$\omega_0^2 = \frac{R + R_1}{LCR_1},$$

где t – время, с; E – ЭДС источника питания, В; L – индуктивность катушки реле, Гн; C – емкость конденсатора в цепи, Ф; R – сопротивление обмотки реле, Ом; R_1 – сопротивление в схеме, Ом.

В случае аperiodического переходного процесса при $\frac{b}{CR_1} > \omega_0^2$ емкость конденсатора замедляет работу

реле, а при $\frac{b}{CR_1} < \omega_0^2$ ускоряет работу реле.

Чем меньше параметр $L \frac{\sqrt{b^2 - \omega_0^2}}{R_1 + R - Lb}$, тем раньше

скажется влияние емкости конденсатора на скорость протекания переходного процесса [7].

Для анализа релейных схем представляет интерес схема Гульстада (рисунок 2) при работе ключа на замыкание [7].

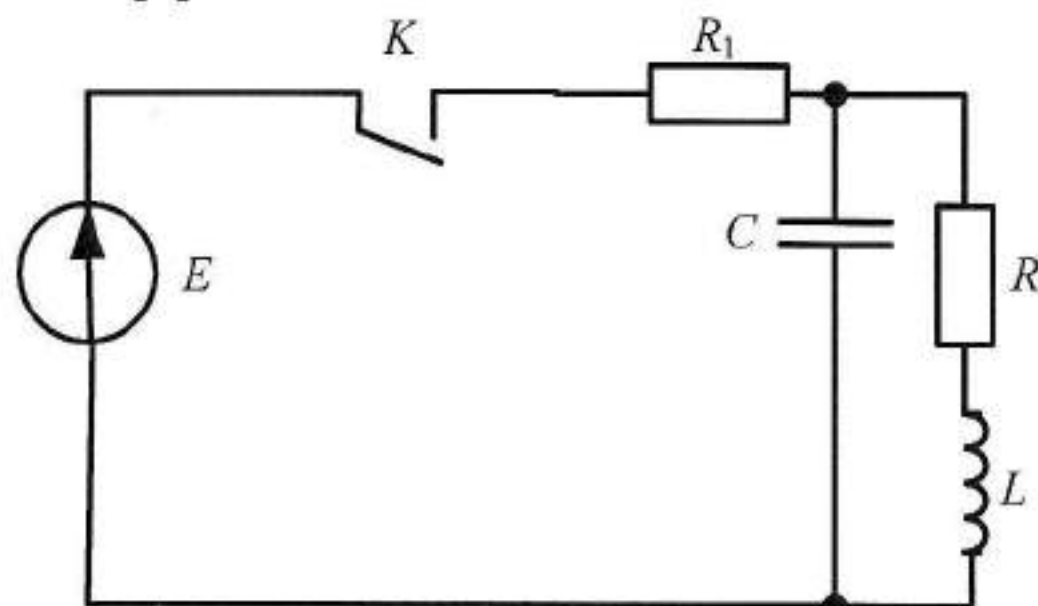


Рисунок 2 – Схема Гульстада

Расчет переходных процессов в ней выполнен в [7, 10] классическим методом расчета переходных процессов, в частности, получено выражение для переходного тока в обмотке реле для апериодического процесса. Примечательными являются следующие обстоятельства. Выражение для переходного тока может быть получено в виде замкнутого выражения общей формы. Независимое начальное условие для тока в индуктивности находится по закону коммутации и является нулевым. Зависимое начальное условие для первой производной тока в индуктивности также легко найти путем целесообразного разбиения схемы на контуры и применения законов Кирхгофа. Нахождение начальных условий будет полезным упражнением для студентов. Константы интегрирования вычисляются по известным формулам из [11], учитывая нулевое начальное условие для тока. Эти формулы заметно упрощают расчеты переходных процессов в цепях второго порядка, поэтому усвоение их студентами весьма желательно.

Расчет переходного процесса для тока в индуктивности при работе ключа в схеме Гульстада на размыкание соответствует классической задаче о разряде в последовательном RLC -контуре [12]. Однако в этом случае иначе определяются независимое начальное условие для тока в катушке и зависимое начальное условие для первой производной этого тока [7].

Начальное значение тока в катушке на основании закона коммутации [11, 12] и послекоммутационной схемы на рисунке 2

$$i(0+) = i(0-) = \frac{E}{R + R_1}.$$

Начальное условие для первой производной тока в катушке определяется путем составления уравнения по второму закону Кирхгофа для послекоммутационной схемы с учетом независимого начального условия для напряжения на конденсаторе [11, 12]. Это начальное условие имеет вид [7]

$$u_C(0+) = u_C(0-) = i(0-)R = \frac{ER}{R + R_1}.$$

Тогда зависимое начальное условие имеет вид

$$i'(0+) = -\frac{2ER}{R + R_1} \frac{1}{L}.$$

Поэтому задача может стать полезным упражнением для обучающихся.

Отметим, что в [7] в выражении для зависимого начального условия допущена опечатка.

Также в [7] рассматривается задача о переходном процессе в катушке реле с учетом того, что индуктивность катушки меняется в зависимости от положения якоря. Эта зависимость показана на рисунке 3. На участке от 0 до t_1 якорь в отпущенном положении, на участке от t_1 до t_2 якорь перемещается, и на участке от t_2 до ∞ якорь в притянутом положении.

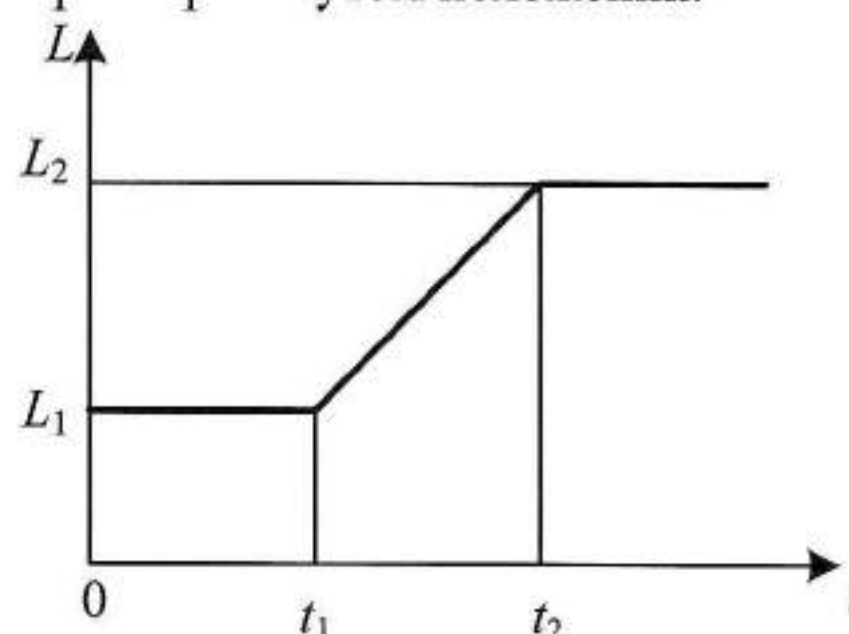


Рисунок 3 – Изменение индуктивности катушки реле при движении якоря

Таким образом, зависимость индуктивности от времени в процессе движения якоря является нелинейной, кусочно-линейной. Поэтому задача расчета переходного процесса, в общем случае, также нелинейная. Решение этой задачи целесообразно осуществить методом кусочно-линейной аппроксимации в форме, указанной в [13]. В [7] решение задачи проводится специальным методом, поэтому оно мало подходит для целей преподавания.

Предполагается, что реле с обмоткой, схема замещения которой представляет собой последовательную RL цепь, подключается к источнику постоянной ЭДС E .

На участке от 0 до t_1 переходный процесс в последовательной RL -цепи описывается уравнением Гельмгольца [7]

$$L_1 \frac{di}{dt} + Ri = E. \quad (2)$$

Решение его по [7]:

$$i(t) = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L_1}t} \right). \quad (3)$$

В момент времени t_1 значение тока в обмотке $i(t) = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L_1}t} \right)$. В этот момент времени якорь

начинает движение. В процессе движения якоря индуктивность катушки меняется по закону $L(t) = a + bt$. Коэффициенты a и b могут быть определены на основании уравнения прямой по двум точкам [14] на гра-

фике зависимости индуктивности от времени (см. рисунок 3) [7]:

$$a = \frac{L_1 t_2 - L_2 t_1}{t_2 - t_1}; \quad b = \frac{L_2 - L_1}{t_2 - t_1}.$$

Тогда переходный процесс в цепи описывает уравнение

$$L(t) \frac{di}{dt} + Ri = E \quad \text{или} \\ \frac{di}{dt} + \frac{R}{a+bt} i = \frac{E}{a+bt}. \quad (4)$$

Это линейное неоднородное уравнение первого рода. Его решение с учетом начального условия – значения тока в момент времени t_1 – имеет вид [14, 15]

$$i(t) = \left(\frac{1}{a+bt} \right)^{-\frac{R}{a}} \left(i_1 \left(\frac{1}{a+bt} \right)^{-\frac{R}{a}} - \frac{aE(a+bt_1)^{-\frac{R}{a}}}{bR} \right) + \\ + a \frac{E(a+bt)^{-\frac{R}{a}}}{bR}. \quad (5)$$

В момент времени t_2 якорь заканчивает движение. При этом значение тока в катушке $i(t_2)$ определяется из (5). Оно является начальным условием для расчета переходного процесса в обмотке реле на следующем этапе. Дальнейший переходный процесс описывается уравнением Гельмгольца

$$L_2 \frac{di}{dt} + Ri = E.$$

Его решение, с учетом начального условия, имеет вид [12, 15]

$$i(t) = \frac{E}{R} + \frac{i_2 - \frac{E}{R}}{e^{\frac{R}{L_2} t}}. \quad (6)$$

Эта задача полезна тем, что является подготовительной для изучения процессов в нелинейных цепях. Кроме того, на каждом этапе ее решения применяется классический метод расчета переходных процессов в форме, более сложной, чем в предыдущих рассмотренных задачах. Потому эта задача служит также для закрепления знаний по методам расчета переходных процессов и по теории дифференциальных уравнений.

Отметим, что использование этой задачи в курсе теоретических основ электротехники для студентов железнодорожников имеет некоторое преимущество перед рассмотрением задач о периодическом переключении в RL -цепи [12], так как рассматриваемая задача ближе к описанию работы реле в аппаратуре железнодорожной автоматики.

Значительный интерес для расчетов релейной аппаратуры представляют некорректные коммутации в схеме на рисунке 4 [16].

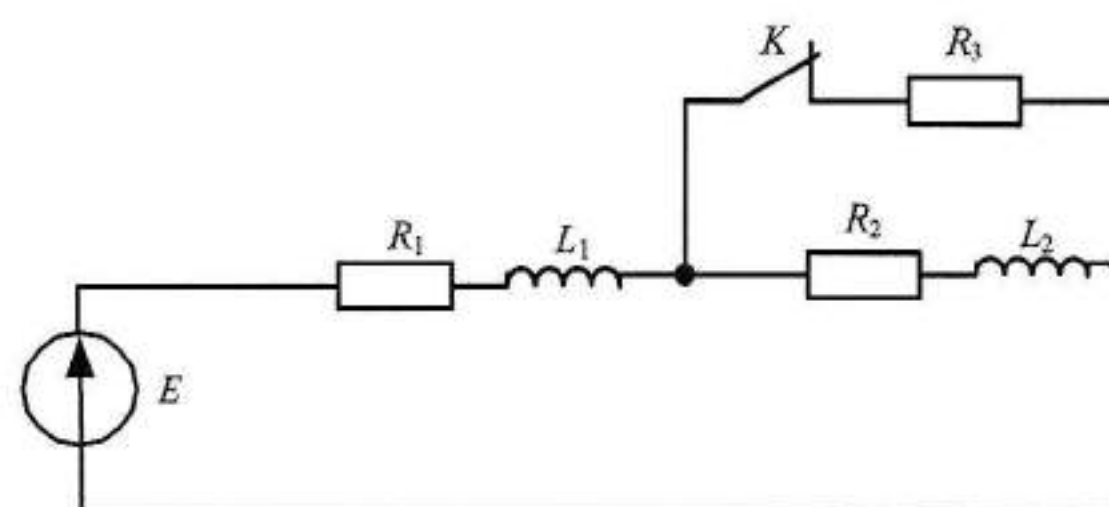


Рисунок 4 – Некорректные коммутации при переключении реле

Поэтому анализ переходных процессов в схеме на рисунке 4 с помощью обобщенного закона коммутации [16] необходимо сохранять в курсе теоретических основ электротехники для специалистов по автоматике и телемеханике.

Заключение.

Проведенное в статье рассмотрение задач о расчете переходных процессов позволяет сделать следующий вывод: имеющиеся в литературе, но не получившие широкого распространения задачи о переходных процессах в обмотках катушек реле сохранили методический интерес и могут найти свое место в курсах теоретических основ электротехники, учитывающих потребности специалистов СЦБ. Таким образом, будет осуществлено практико-ориентированное обучение. Проблема практико-ориентированного обучения в настоящее время является актуальной, т. к. такое обучение значительно повышает подготовленность и востребованность выпускников транспортных вузов.

Список литературы

- 1 Кононов, В. А. Основы проектирования электрической централизации промежуточных станций / В. А. Кононов, А. А. Лыков, А. Б. Никитин. – М.: УМК МПС России, 2002. – 316 с.
- 2 ЩигOLEV, С. А. Микропроцессорная полуавтоматическая блокировка / С. А. ЩигOLEV. – Екатеринбург: НИЦ Промэлектроника, 2016. – 144 с.
- 3 Моисеев, В. В. Перспективы развития МПЦ и РПЦ / В. В. Моисеев // Автоматика, связь, информатика. – 2019. – № 7. – С. 7–10.
- 4 Комплексная технология интервального регулирования движения поездов / В. А. Воронин, И. Р. Гургенидзе, М. А. Дежков [и др.]; под ред. С. А. Кобозева. – М.: Издательские технологии, 2022. – 288 с.
- 5 Харазов, К. И. Реле с магнитоуправляемыми контактами / К. И. Харазов. – М.: Энергия, 1971. – 88 с.
- 6 Гуревич, В. И. Защита оборудования подстанций от электромагнитного импульса / В. И. Гуревич. – М.: Информ-Инженерия, 2016. – 302 с.
- 7 Коваленков, В. И. Основы теории магнитных цепей и применение ее к анализу релейных схем / В. И. Коваленков. – М.: Изд. АН СССР, 1940. – 158 с.
- 8 Хабигер, Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее применения в технике / Э. Хабигер. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 304 с.
- 9 Кечиев, Л. Н. Электромагнитная несовместимость: опасности, катастрофы, риски / Л. Н. Кечиев. – М.: Грифон, 2022. – 544 с.
- 10 Гинзбург, С. Г. Методы решения задач по переходным процессам в электрических цепях / С. Г. Гинзбург. – М.: Высш. шк., 1967. – 387 с.

11 **Бессонов, Л. А.** Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М. : Высш. шк., 1978. – 528 с.

12 Основы теории цепей / Т. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – 5-е изд., перераб. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 572 с.

13 Теоретические основы электротехники : в 3 т / К. С. Демирчан, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. – СПб. : Питер, 2003. – Т. 2. – 377 с.

14 **Воднев, В. Т.** Основные математические формулы / В. Т. Воднев, А. Ф. Наумович, Н. Ф. Наумович. – Минск : Высш. шк., 1988. – 269 с.

15 **Пономарев, К. К.** Составление дифференциальных уравнений / К. К. Пономарев. – Минск : Высш. шк., 1973. – 560 с.

16 **Поливанов, К. М.** Линейные электрические цепи с сосредоточенными постоянными / К. М. Поливанов. – М. : Энергия, 1972. – 240 с.

Получено 05.09.2025

D. V. Komnatny. Problems on transients in course of theoretical electrotechnic for specialists in railway signaling, interlocking and blocking.

Separate problems on transients, which arise during electromagnetic relay operation analyzing, are considered. These problems have a theoretical interest. Also, their matter associated with actual practical questions for railway automatic and telemechanic systems. The peculiarities of transient computations in circuits "Maxwell's ground" and "Gulstad circuit" are analyzed. The problem of transients in relay coil during armature motion is solved by piecewise linear approximation method. It is shown, that inclusion of these problems in the course of theoretical electrotechnic served the aims of practical-competent education.

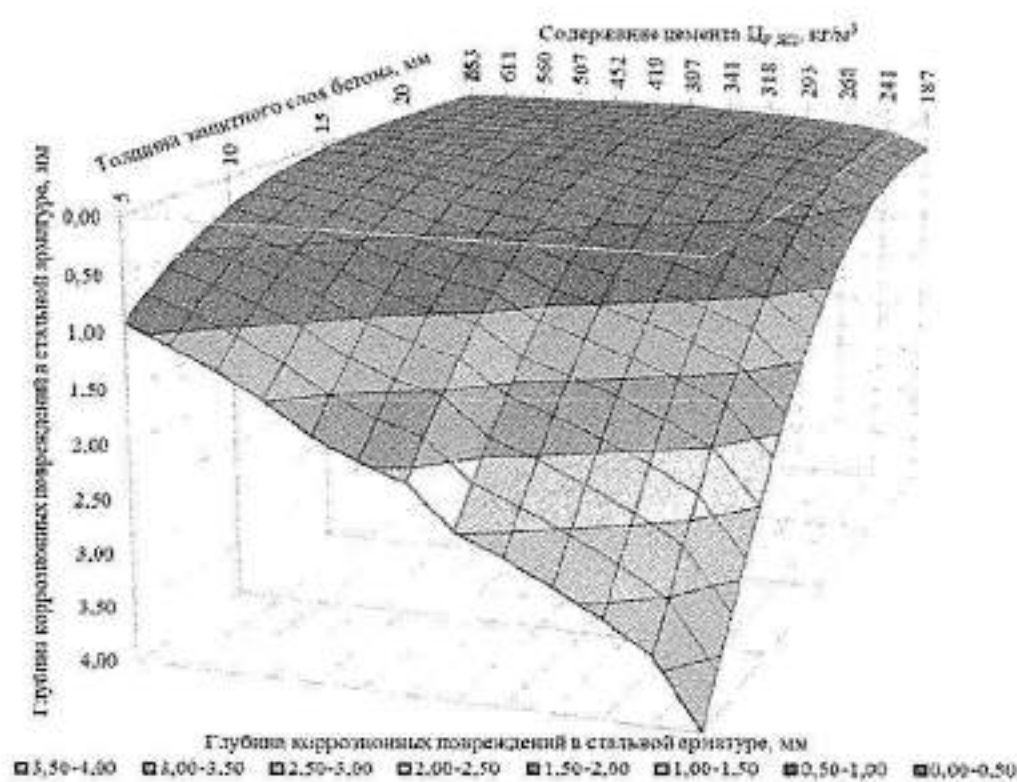


Рисунок 3 – Зависимость $h = f(t = 50 \text{ лет}, s, Ц_r)$ для бетонной смеси марки по удобоукладываемости Ж2

Использование зависимости (1) позволяет с достаточно высокой точностью определять глубину коррозионных повреждений стальной арматуры (S500) в карбонизированном бетоне, однако ее практическое применение не только не совсем удобно, для ее использования необходимо для каждого класса бетона по прочности на сжатие знать (рассчитать) значение $Ц_r$.

Для возможности использования зависимости (1) в нормативных документах без дополнительных (достаточно сложных) расчетов содержания цемента необходимо получить зависимость $h = f(Ц_r, s, t_{тр})$ для различных классов бетона по прочности на сжатие с учетом особенностей получения (назначения) параметра $Ц_r$.

При использовании бетонов с отпускной прочностью 70–100 % необходимо пользоваться зависимостью $Ц_r = f(R)$, полученной на базе исследования значений $Ц_r$ от граничных значений отпускной прочности, которая в общем виде имеет следующий вид:

$$Ц_r = k_1 R + k_2, \quad (2)$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты, аппроксимирующие линейную зависимость; $k_1, \text{ м}^3 \cdot \% / \text{кг}$; $k_2, \text{ кг} / \text{м}^3$.

Зависимости $Ц_r = f(R)$ для марок бетонных смесей по удобоукладываемости П1, Ж1 и Ж2 приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость $Ц_r = f(R)$ для бетонных смесей различных марок по удобоукладываемости

Класс бетона по прочности на сжатие	$Ц_r = f(R)$ для бетонной смеси марки по удобоукладываемости		
	П1	Ж1	Ж2
$C^{12}/_{15}$	$1,742R + 90,56$	$1,580R + 83,07$	$1,526R + 80,21$
$C^{16}/_{20}$	$2,295R + 114,1$	$2,045R + 107,5$	$1,970R + 104,1$
$C^{18}/_{22,5}$	$2,735R + 112,4$	$2,189R + 127,1$	$2,011R + 132,9$
$C^{20}/_{25}$	$3,249R + 105,7$	$2,729R + 111,7$	$2,533R + 115,4$
$C^{22}/_{27,5}$	$3,759R + 100,8$	$3,267R + 98,93$	$3,039R + 103,3$
$C^{25}/_{30}$	$3,915R + 120,7$	$3,504R + 107,8$	$3,300R + 108,2$
$C^{28}/_{35}$	$5,029R + 111,0$	$4,512R + 97,99$	$4,330R + 93,29$
$C^{30}/_{37}$	$5,362R + 112,7$	$4,822R + 99,24$	$4,633R + 94,77$
$C^{32}/_{40}$	$5,868R + 116,5$	$5,286R + 101,8$	$5,077R + 96,95$
$C^{35}/_{45}$	$6,727R + 119,4$	$6,046R + 104,9$	$5,797R + 99,99$
$C^{40}/_{50}$	$7,593R + 120,4$	$6,820R + 106,2$	$6,548R + 101,3$
$C^{45}/_{55}$	$8,421R + 121,9$	$7,577R + 107,0$	$7,273R + 102,0$
$C^{50}/_{60}$	$9,254R + 123,1$	$8,329R + 107,7$	$8,003R + 102,8$

Так как массово применяются железобетонные изделия, выполненные из бетонов с отпускной прочностью 70 %, в которых использованы бетонные смеси

марок по удобоукладываемости П1, Ж1 и Ж2, расчетные содержания цемента получены для ОК = 4 см (марка смеси по удобоукладываемости П1), 8 см (Ж1) и 15 см (Ж2) (таблица 2).

Таблица 2 – Значения $Ц_r$ для различных классов бетона по прочности на сжатие

Класс бетона по прочности на сжатие	$Ц_r, \text{ кг} / \text{м}^3$, для марки бетонной смеси по удобоукладываемости		
	П1	Ж1	Ж2
$C^{12}/_{15}$	213	194	187
$C^{16}/_{20}$	275	251	242
$C^{18}/_{22,5}$	305	280	274
$C^{20}/_{25}$	334	303	293
$C^{22}/_{27,5}$	365	328	316
$C^{25}/_{30}$	397	353	339
$C^{28}/_{35}$	464	414	396
$C^{30}/_{37}$	490	437	419
$C^{32}/_{40}$	529	472	452
$C^{35}/_{45}$	592	528	506
$C^{40}/_{50}$	654	584	560
$C^{45}/_{55}$	714	637	611
$C^{50}/_{60}$	774	691	663

Используя значения $Ц_r$ (см. таблицу 1) и зависимость (1) для бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12}/_{15} - C^{50}/_{60}$ для граничных значений $s = 10 \dots 25$ мм с шагом 1 мм рассчитаны значения h .

По полученным значениям, с учетом математической обработки, получены зависимости $h = f(Ц_r, t_{тр}, s)$ для толщин защитного слоя бетона 5–50 мм, что наиболее приемлемо как для эксплуатируемых, так и для проектируемых железобетонных изделий.

В общем виде зависимость $h = f(Ц_r, t_{тр}, s)$ будет представлена как

$$h = k_1 s^4 + k_2 s^3 + k_3 s^2 + k_4 s + k_5, \quad (3)$$

где $k_1 - k_5$ – коэффициенты, аппроксимирующие полиномиальную кривую 4-й степени; $k_1, \text{ мм} / \text{мм}^4$; $k_2, \text{ мм} / \text{мм}^3$; $k_3, \text{ мм} / \text{мм}^2$; $k_4, \text{ мм} / \text{мм}$; $k_5, \text{ мм}$.

Зависимости $h = f(Ц_r, t_{тр}, s)$ для бетонных смесей марок по удобоукладываемости П1, Ж1 и Ж2 представлены соответственно в таблицах 3–5.

Таблица 3 – Зависимость $h = f(Ц_r, t_{тр}, s)$ для бетонной смеси марки по удобоукладываемости П1

Класс бетона по прочности на сжатие	$h = f(Ц_r, t_{тр}, s)$	R^2
$C^{12}/_{15}$	$h = 5 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 69 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0355s^2 - 0,8044s + 7,0129$	0,9983
$C^{16}/_{20}$	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 60 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0308s^2 - 0,6948s + 5,8736$	0,9989
$C^{18}/_{22,5}$	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 57 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0292s^2 - 0,6515s + 5,4077$	0,9990
$C^{20}/_{25}$	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 55 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0278s^2 - 0,6126s + 4,9945$	0,9989
$C^{22}/_{27,5}$	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 52 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0264s^2 - 0,5744s + 4,5993$	0,9988
$C^{25}/_{30}$	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 50 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0248s^2 - 0,5342s + 4,1979$	0,9985
$C^{28}/_{35}$	$h = 3 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 44 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0218s^2 - 0,4567s + 3,4674$	0,9975
$C^{30}/_{37}$	$h = 3 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 42 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0207s^2 - 0,4301s + 3,2285$	0,9970
$C^{32}/_{40}$	$h = 3 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 39 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0190s^2 - 0,3906s + 2,8850$	0,9961
$C^{35}/_{45}$	$h = 3 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 35 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0164s^2 - 0,3324s + 2,3992$	0,9941
$C^{40}/_{50}$	$h = 2 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 30 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0142s^2 - 0,2819s + 1,9954$	0,9916
$C^{45}/_{55}$	$h = 2 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 26 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0122s^2 - 0,2392s + 1,6657$	0,9889
$C^{50}/_{60}$	$h = 2 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 22 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0104s^2 - 0,2022s + 1,3879$	0,9855

Таблица 4 – Зависимость $h = f(\sigma_p, t_{гр}, s)$ для бетонной смеси марки по удобоукладываемости Ж1

Класс бетона по прочности на сжатие	$h = f(\sigma_p, t_{гр}, s)$	R ²
C ¹² /15	$h = 5 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 73 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0374s^2 - 0,7455s + 7,4086$	0,9980
C ¹⁶ /20	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 63 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0323s^2 - 0,7313s + 6,2636$	0,9988
C ¹⁸ /22,5	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 59 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0306s^2 - 0,6888s + 5,8089$	0,9989
C ²⁰ /25	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 57 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0292s^2 - 0,6501s + 5,3929$	0,9990
C ²² /27,5	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 55 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0279s^2 - 0,6152s + 5,0219$	0,9989
C ²⁵ /30	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 53 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0267s^2 - 0,5831s + 4,6888$	0,9988
C ²⁸ /35	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 48 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0239s^2 - 0,5095s + 3,9590$	0,9982
C ³⁰ /37	$h = 3 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 46 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0229s^2 - 0,4844s + 3,7218$	0,9979
C ³² /40	$h = 3 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 44 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0213s^2 - 0,4449s + 3,3604$	0,9973
C ³⁵ /45	$h = 3 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 39 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0188s^2 - 0,3867s + 2,8517$	0,9960
C ⁴⁰ /50	$h = 3 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 35 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0166s^2 - 0,3350s + 2,4205$	0,9942
C ⁴⁵ /55	$h = 2 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 31 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0145s^2 - 0,2904s + 2,062$	0,9921
C ⁵⁰ /60	$h = 2 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 27 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0127s^2 - 0,2507s + 1,7535$	0,9896

Таблица 5 – Зависимость $h = f(\sigma_p, t_{гр}, s)$ для бетонной смеси марки по удобоукладываемости Ж2

Класс бетона по прочности на сжатие	$h = f(\sigma_p, t_{гр}, s)$	R ²
C ¹² /15	$h = 5 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 75 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0384s^2 - 0,8658s + 7,5973$	0,9978
C ¹⁶ /20	$h = 5 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 64 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0331s^2 - 0,7502s + 6,4624$	0,9987
C ¹⁸ /22,5	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 61 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0312s^2 - 0,7056s + 5,9890$	0,9989
C ²⁰ /25	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 58 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0298s^2 - 0,6684s + 5,5889$	0,9990
C ²² /27,5	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 56 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0285s^2 - 0,6338s + 5,2183$	0,9989
C ²⁵ /30	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 54 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0274s^2 - 0,6035s + 4,8995$	0,9989
C ²⁸ /35	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 50 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0248s^2 - 0,5342s + 4,1979$	0,9985
C ³⁰ /37	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 48 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0238s^2 - 0,5083s + 3,9480$	0,9982
C ³² /40	$h = 3 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 46 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0224s^2 - 0,4710s + 3,5977$	0,9977
C ³⁵ /45	$h = 3 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 41 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0199s^2 - 0,4126s + 3,0746$	0,9966
C ⁴⁰ /50	$h = 3 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 37 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0177s^2 - 0,3611s + 2,6358$	0,9952
C ⁴⁵ /55	$h = 3 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 33 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0157s^2 - 0,3162s + 2,2681$	0,9934
C ⁵⁰ /60	$h = 2 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 29 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0138s^2 - 0,2751s + 1,9423$	0,9912

В графическом виде зависимости $h = f(\sigma_p, t_{гр}, s)$ для класса бетона по прочности на сжатие C²⁰/25 и бетонных смесей марок по удобоукладываемости П1, Ж1 и Ж2 приведена на рисунке 4.

Заключение. Полученные зависимости $h = f(\sigma_p, t_{гр}, s)$ позволяют прогнозировать с достаточно высокой точностью глубину коррозии стальной арматуры в карбонизированном бетоне. Их использование в НД значительно повысит объективность оценки долговеч-

ности и остаточного ресурса железобетонных изделий, эксплуатирующихся в условиях открытой атмосферы.

Кроме того, приведенный алгоритм дает возможность прогнозировать коррозию стальной арматуры для любых сроков эксплуатации железобетона.

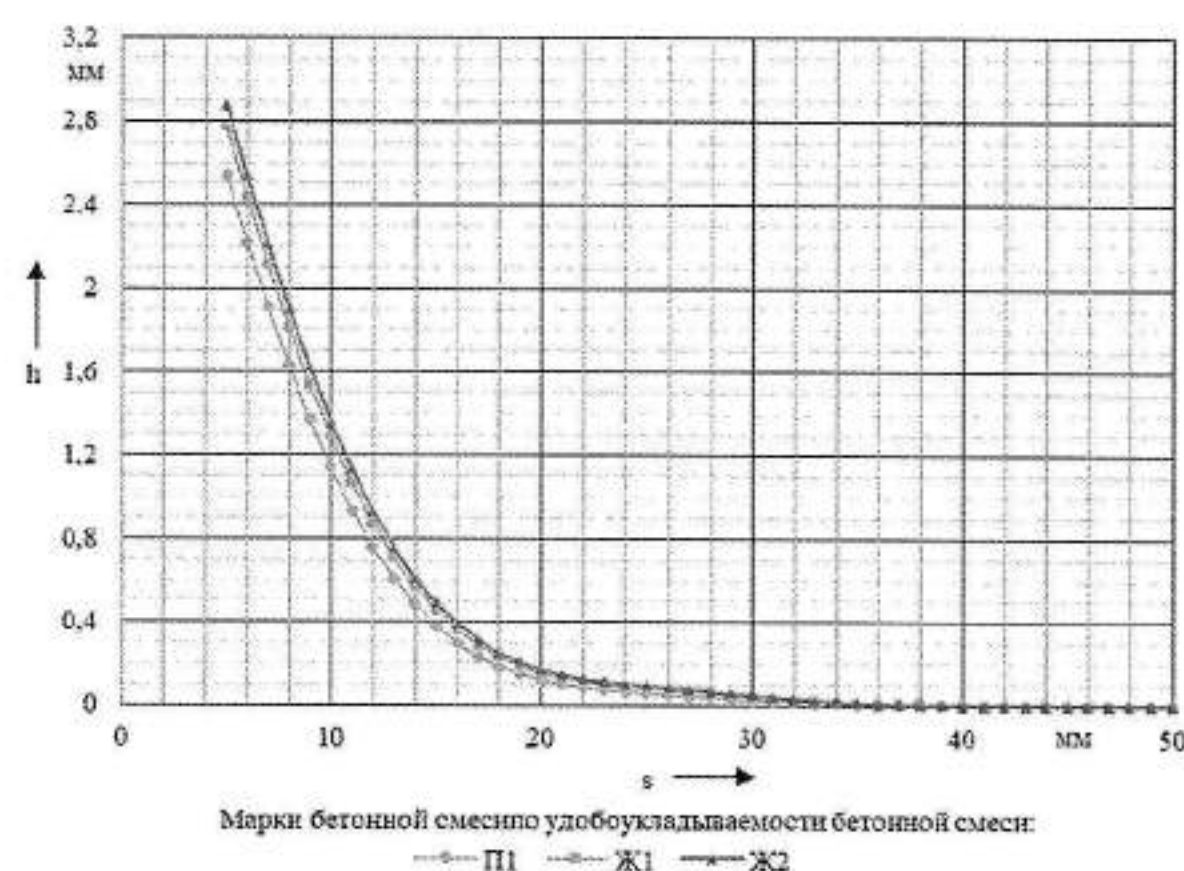


Рисунок 4 – Зависимость $h = f(t = 50 \text{ лет}, s, \sigma_p)$ для класса бетона по прочности на сжатие C²⁰/25

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. Оценка существующей модели карбонизации бетона / А. А. Васильев // Строительная наука и техника. – 2009. – № 1 (22). – С. 54–58.
- 5 Васильев, А. А. Прогнозирование фактической карбонизации с учетом технологических параметров бетона : монография / А. А. Васильев, А. М. Нияковский. – Гомель : БелГУТ, 2024. – 206 с.
- 6 Васильев, А. А. К вопросу необходимости учета карбонизации бетона в нормативных документах Республики Беларусь по оценке технического состояния железобетонных элементов и конструкций / А. А. Васильев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2017. – № 1 (34). – С. 87–88.
- 7 Васильев, А. А. Прогнозирование степени коррозионных повреждений стальной арматуры от расчетного содержания цемента для эксплуатационных условий открытой атмосферы / А. А. Васильев, М. И. Ткачева, С. В. Хрищанович // Лучшая научно-исследовательская работа 2025 : сб. статей VII Междунар. науч.-исслед. конф. – Пенза : Наука и Просвещение, 2025. – С. 45–50.

Получено 05.05.2025

A. A. Vasilyev, M. I. Tkacheva, K. A. Ageeva, A. V. Savelyeva. Prediction of steel reinforcement corrosion damage depth for concretes of different compressive strength classes in open atmosphere.

The significance of assessment and prediction of the degree of corrosion damage of steel reinforcement in reinforced concrete products is shown. The relationships between the depth of corrosion of steel reinforcement in an open atmosphere and the calculated cement content for different thicknesses of the protective layer of concrete of concrete mixtures of grades by the workability of П1, Ж1 and Ж2 are given in graphic form. For the possibility of use in НД, mathematical dependencies of the depth of corrosion of steel reinforcement from the calculated content of cement for different thicknesses of the protective layer of concretes of compression strength classes of C¹²/15–C⁵⁰/60 operating in an open atmosphere (concrete mixtures of grades П1, Ж1 and Ж2) were obtained. The obtained relationships for concrete of compression strength class C²⁰/25 are given in graphical form.

УДК 625.142.21

В. В. РОМАНЕНКО, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ СОСТАВНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ ШПАЛ

Рассматриваются основные положения по изготовлению составных деревянных шпал, с акцентом на возможность использования остатков переводных и мостовых брусьев. Исследование направлено на анализ практических аспектов применения остатков без изменения их размеров, что может способствовать снижению затрат и оптимизации производственных процессов.

Введение. В современных условиях соблюдение экологических стандартов для деревообрабатывающих предприятий становится всё более актуальным, так как для производственной деятельности они используют лесные ресурсы, а именно «деловую» древесину возраста 80–100 лет.

Предприятия, производящие шпалопродукцию, используют древесину, которая должна удовлетворять ряду требований. Сортировка лесоматериалов осуществляется по диаметру, длине, кривизне и качеству древесины.

Все деревянные шпалы, необходимые для Белорусской железной дороги (БЖД), производятся на ОАО «Борисовский шпалопродиточный завод» (БШПЗ). Процесс производства деревянных шпал состоит из нескольких этапов и начинается с вырезания шпалопродукции из пиловочного бревна, которое затем сушится до необходимой влажности. После сушки производится равномерное насыщение антисептиком.

Шпалопродукция представляет собой шпалы, переводные и мостовые брусья. Длина стандартной шпалы для колеи шириной 1520 мм – 2,75 м, переводных брусьев для стрелочных переводов – от 3,0 до 5,5 м (с шагом 0,25 м), мостовых – 3,0 м.

БШПЗ закупает лесоматериалы длиной 5,5 метров, из которых нарезают шпалопродукцию. Две стандартные шпалы нарезаются из пиловочного бревна без его остатка, в то время как после нарезки мостовых и переводных брусьев остаются остатки бревен, которые невозможно применить для изготовления цельнобрусковой шпалопродукции.

Анализ объемов производства переводных и мостовых брусьев на БШПЗ показывает, что значительная часть остатков лесоматериалов, не подходящих для производства стандартных шпал, накапливается ежегодно. Часть этих остатков реализуется, например, в виде пиломатериалов, полушпал для метрополитенов и шпал для узкоколейных дорог, остальная – утилизируется.

Анализ прогнозируемых объемов неостребованной древесины указывает на рост нерентабельных расходов на сырьевые ресурсы. Решение о рациональном использовании остатков может стать вопросом экономической целесообразности, поскольку использование остатков в производстве деревянной продукции, например, составных деревянных шпал (СДШ), поможет значительно сократить потребность в новых лесоматериалах и поддержать сохранение лесных ресурсов [1].

Характеристика лесоматериалов. В зависимости от географических условий, в разных странах для про-

изводства шпал используются различные породы древесины, такие как дуб, красный клен, кедр и лиственница. В Республики Беларусь и Российской Федерации предпочтение отдается сосне из-за ее прямолинейности и высокой устойчивости.

Улучшение качества древесины возможно благодаря различным методам обработки, таким как сушка и пропитка антисептиками, что увеличивает срок службы и эксплуатационные характеристики материала. Несмотря на современные технологии, сортировка и классификация древесины остаются важными процессами, определяющими качество конечного продукта.

Диаметр бревна d должен соответствовать размерам конечной продукции. Размеры поперечных сечений шпал должны установлены для древесины с влажностью не более 22 %, при этом оптимальный диаметр:

$$d = 2,5sL + 1,414 (H + y_h),$$

где s – средний сбег бревна, см/м; L – длина бревна, м; H – толщина бруса, мм; y_h – усушка по толщине бруса до необходимой влажности, мм.

Для производства шпал диаметр бревна должен составлять не менее 39 см для шпал, 40 см для переводных и 46 см для мостовых брусьев. Бревна должны иметь припуск по длине на усушку в 0,05 м и быть правильно подготовленными: ровно сторцованы, все сучья обрублены, а инородные включения удалены.

Основные положения по изготовлению СДШ.

Стандартные шпалы изготавливаются трех типов, от которых зависят размеры поперечного сечения: I тип – 180×250 мм; II тип – 160×230 мм; III тип – 150×230 мм.

Размеры поперечного сечения брусьев также зависят от типа: переводных – 180×300 мм, 160×280 мм, 160×230 мм (соответственно для I, II и III типов); мостовых – 200×240 мм, 220×260 мм, 220×280 мм и 240×300 мм (соответственно для I, II, III и IV типов).

Так как остатки бревен получаются в результате изготовления переводных и мостовых брусьев, поперечные размеры СДШ, получаемых из этих остатков не будут соответствовать поперечным размерам типовых шпал [2].

Приведение размеров поперечных сечений остатков от брусьев к шпалам вызовет необходимость дополнительной обрезки как минимум с двух сторон, что вызовет усложнение технологии изготовления (перенастройка оборудования) и увеличит себестоимость продукции [3].

Размеры стандартной шпалы вызывают напряжения в балласте на уровне ее нижней постели σ_b , не превышающие допускаемые $[\sigma_b]$, а также определяют минимальную толщину балласта под шпалой $\min h_b$. Изменение размеров поперечного сечения СДШ не должно вызывать $\sigma_b > [\sigma_b]$ и $h_b > \min h_b$, расчетные параметры определяются согласно конструкции шпалы и схеме приложения нагрузок [4].

После определения напряжений под полушпалой на уровне ее нижней постели в балласте необходимо определить минимальную толщину балласта под шпалой.

Исследование возможности применения остатков переводных и мостовых брусьев без изменения их размеров. Расчетное напряжение вычисляется по формуле

$$\sigma_b = \frac{Q_{\max}}{\alpha l_{\text{шп}} b_{\text{шп}}}, \quad (1)$$

где Q_{\max} – вертикальное давление на шпалу от рельса; α – коэффициент учитывающий изгиб шпалы и представляющий отношение средней (по длине) осадки шпалы и ее осадке под рельсами, для деревянных шпал с шагом 750 мм, $\alpha = 0,7 \dots 0,75$; $l_{\text{шп}}$ – длина шпалы, м; $b_{\text{шп}}$ – ширина нижней постели шпалы, м.

Условие, при котором возможно применение полушпал с расчетными размерами – расчетное напряжение σ_b должно быть меньше или равно допускаемому напряжению (рисунок 1) в зависимости от вида балласта $[\sigma_b]$: щебень 25–60 мм – 0,5 МПа (1), щебень мелкий и сортированный гравий – 0,4 МПа (2), карьерный гравий – 0,3 МПа (3), песок крупный и средней крупности – 0,275 МПа (4), песок мелкозернистый – 0,2 МПа (5).

Расчетные напряжения определены для СДШ, изготовленных из остатков от переводных (три типоразмера) и мостовых (четыре типоразмера) брусьев без изменения их размеров.

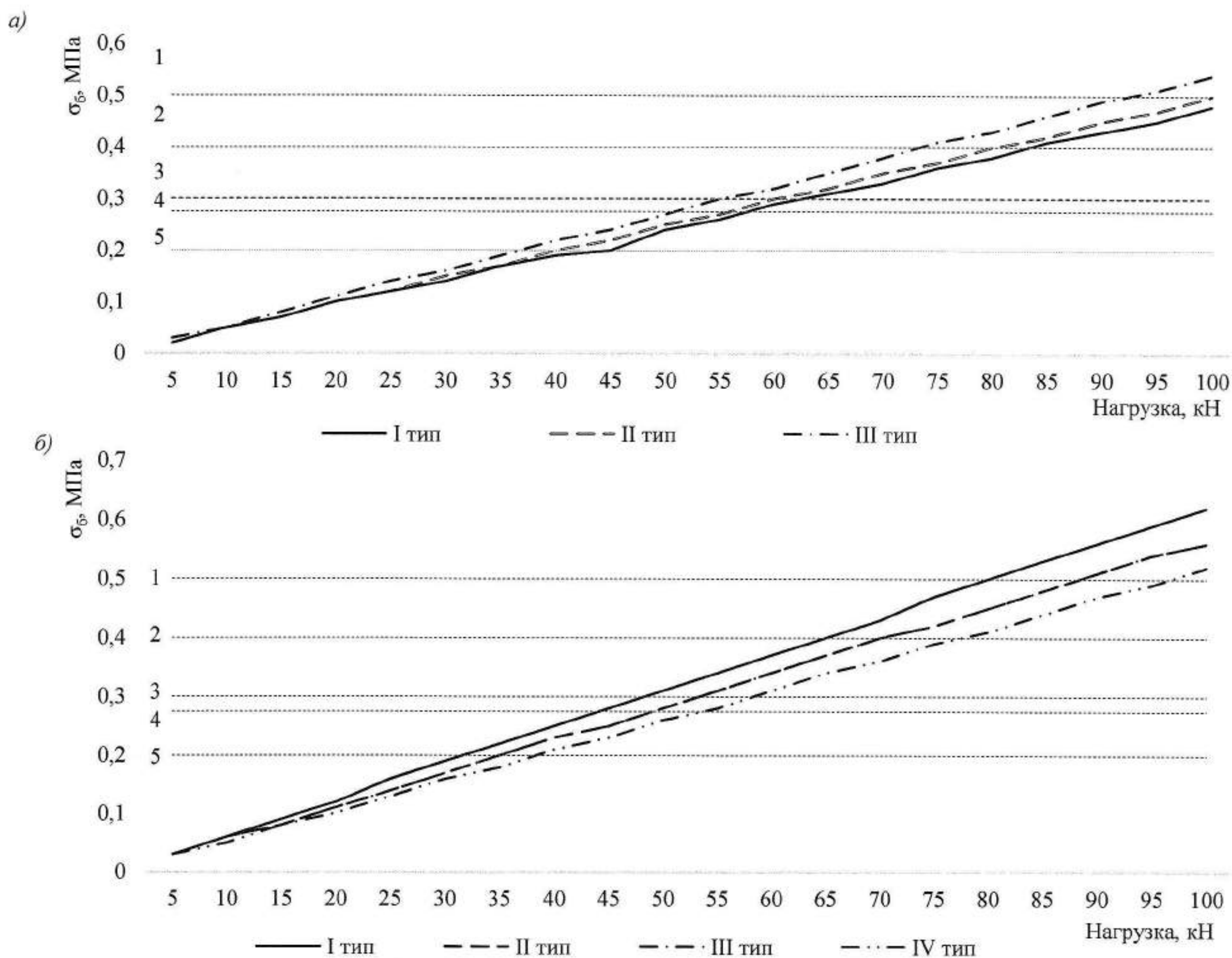


Рисунок 1 – Расчетные напряжения σ_b в балласте под шпалой при изготовлении СДШ из остатков без изменения размеров: а – от переводных брусьев; б – от мостовых брусьев

Толщина балласта под шпалой определяется исходя из следующего неравенства:

$$h_b \geq \sqrt{\left(2 \frac{\sigma_b}{[\sigma_{3,п}]} - 1\right) b l}, \quad (2)$$

где σ_b – расчетное напряжение под элементом составной шпалы на уровне нижней постели в балласте; $[\sigma_{3,п}]$ – допускаемое напряжение в земляном полотне (принимается: для локомотивов – 0,12–0,15 МПа; вагонов – 0,08–0,1 МПа); b – ширина нижней постели шпалы; l – расстояние между осями соседних шпал.

Расчетная толщина балласта под шпалой определена для СДШ, изготовленных из остатков от переводных

(три типоразмера) и мостовых (четыре типоразмера) брусьев без изменения их размеров (рисунок 2).

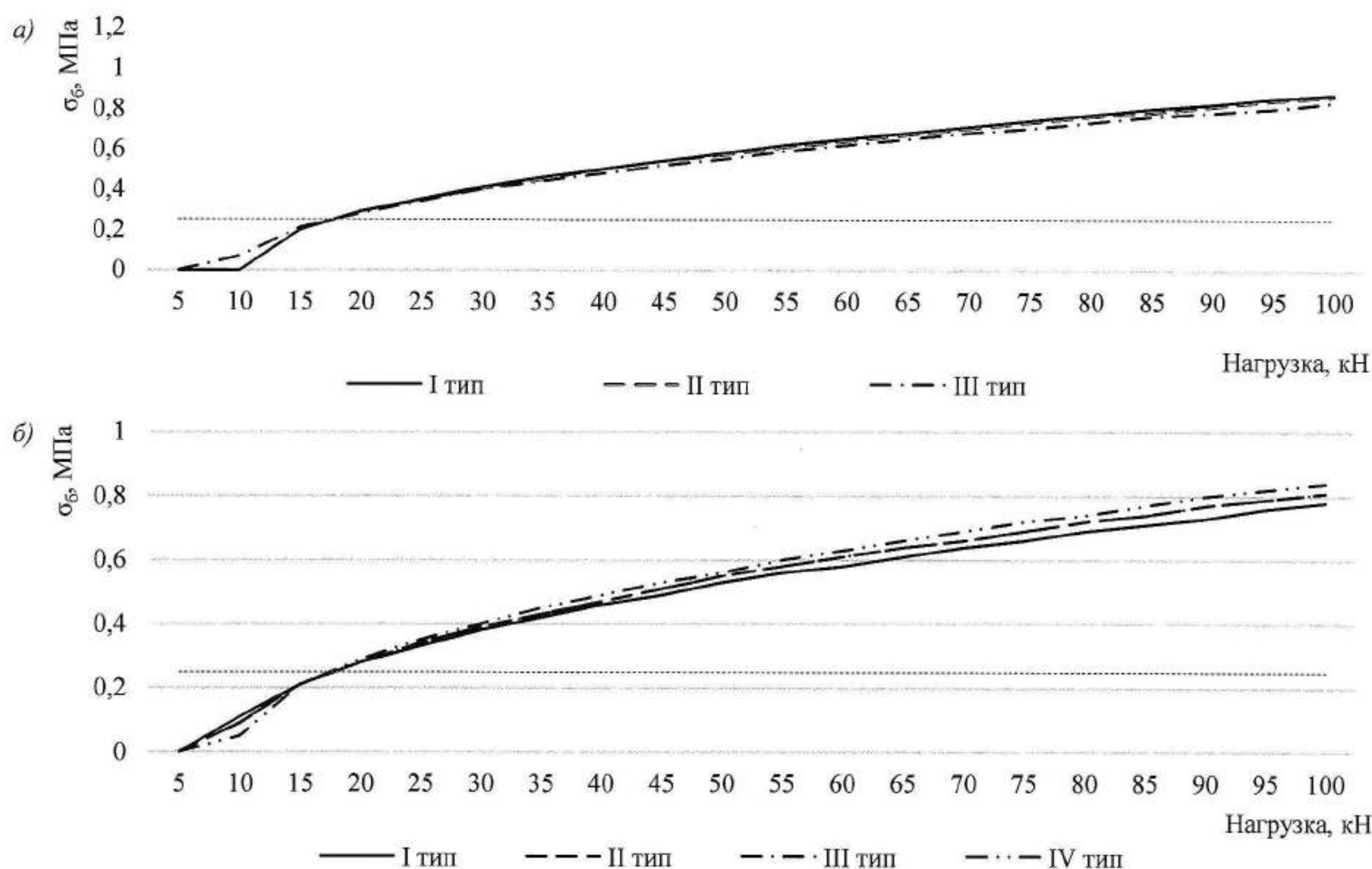


Рисунок 2 – Минимальная толщина балласта под шпалой при изготовлении СДШ из остатков без изменения размеров: а – от переводных брусьев; б – от мостовых брусьев

Вывод. Применение СДШ прогнозируется только для некоторых категорий станционных путей и путей необщего пользования в прямых участках пути, которые отличаются отсутствием горизонтальных сил. Скорость движения до 15 км/ч вызывает несущественные динамические воздействия от подвижного состава значительно ниже, чем статические.

Как видно из рисунка 1, для всех видов балласта напряжения не превышают допустимые при нагрузке 35 кН (для остатков из переводных брусьев) и 30 кН (для остатков из мостовых брусьев). Для указанных путей укладки СДШ, при практическом отсутствии горизонтальных сил, изготовление СДШ по критерию $\sigma_b < [\sigma_b]$ из всех остатков без изменения их размеров возможно.

Минимальная толщина балласта под деревянной шпалой должна составлять 25 см. Анализ рисунка 2 показал, что минимальная толщина балласта соответствует нагрузке (в обоих случаях), равной 15 кН. Согласно условиям укладки изготовление СДШ и по критерию обеспечения минимальной толщины балласта из всех остатков без изменения их размеров также возможно.

Изготовление СДШ позволит снизить рост непроизводительных расходов сырьевых ресурсов БШПЗ, а следовательно, снизить потребность в новых лесоматериалах.

Возможность сокращения технологических операций позволит снизить себестоимость продукции.

Список литературы

- 1 Романенко, В. В. Сохранение окружающей среды за счет внедрения новых конструкций деревянных шпал / В. В. Романенко // Научная сессия ТУСУР-2023 : материалы Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 17–19 мая 2023 г. – Томск : ТУСУР В-Спектр, 2023. – Ч. 2. – С. 317–320.
- 2 Шпалы деревянные для железных дорог широкой колеи. Общие технические условия = Wooden sleepers for full gauge railways. Specifications : ГОСТ 78-2014. – Взамен ГОСТ 78-2004 ; введ. 5.12.2014. – Минск : Госстандарт : Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2014. – 8 с.
- 3 Романенко, В. В. Ресурсосберегающая технология изготовления составных деревянных шпал / В. В. Романенко, А. Б. Невзорова // Труды БГТУ. Серия 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2023. – № 2 (270). – С. 143–151.
- 4 Невзорова, А. Б. Оценка несущей способности составных деревянных шпал, уложенных в путь / А. Б. Невзорова, В. В. Романенко // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. – 2024. – № 3 (98). – С. 5–12.

Получено 20.10.2025

V. V. Romanenko. Optimization of the process of manufacturing component wooden trees.

The article discusses the main provisions for the production of composite wooden sleepers, with a focus on the possibility of using leftover translation and bridge beams. The study aims to analyze the practical aspects of using leftovers without changing their dimensions, which can help reduce costs and optimize production processes.

УДК 625.173.6

В. В. РОМАНЕНКО, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель; Н. А. ГОРБАНЬ, Белорусская железная дорога, г. Минск

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕКЛАДКИ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ С УСИЛЕНИЕМ ПОДРЕЛЬСОВОГО ОСНОВАНИЯ

Рассматриваются актуальные технологии, применяемые при замене подрельсового основания на Белорусской железной дороге, анализируются современные материалы и методы, которые позволяют увеличить долговечность и надежность стрелочных переводов, оцениваются внедрение технологии перекладки стрелочных переводов с усилением подрельсового основания, а также степень ее влияния на общий жизненный цикл стрелочных переводов, анализируются экономические аспекты применения технологических решений и возможности снижения эксплуатационных расходов.

Введение. Верхнее строение железнодорожного пути (ВСП) технически обслуживается путевым хозяйством. Путевое хозяйство Белорусской железной дороги (БЖД) включает порядка 12 тыс. км железнодорожных путей, более 12 тыс. стрелочных переводов, более 1850 искусственных сооружений и т. п.

Объекты инфраструктуры путевого хозяйства для обеспечения надежности эксплуатации железнодорожного транспорта требуют постоянного технического обслуживания, которое включает систему работ текущего содержания и ремонтов.

Организация и выполнение работ по одиночной замене элементов ВСП и стрелочных переводов, комплексной замене стрелочных переводов, замене плетей бесстыкового пути и т. п. возложено на дистанции пути (ПЧ), восстановительный и средний ремонты пути – на РУП «Ремпуть БЖД».

На путеремонтную программу в 2025 году запланировано 167 900 тыс. руб., в том числе 80 113 тыс. руб. – расходы на материалы ВСП, из которых на текущее содержание путевых объектов – 44 585 тыс. руб. (в том числе 10 354 тыс. руб. – на материалы), аналогично на ремонты – 123 315 тыс. руб. (69 759 тыс. руб.).

Производственная деятельность путевого комплекса. Деятельность ориентирована на минимизацию эксплуатационных затрат путем повышения эффективности использования материальных и трудовых ресурсов, при которой большое значение играет диагностика общего состояния путевых объектов и, в частности, рельсовой колеи.

Ежегодная оценка состояния рельсовой колеи показывает 15–20 баллов, что свидетельствует об успехе реализуемой программы ремонта. На снижение количества баллов существенное влияние оказывает стабильность ВСП, которая наилучшим образом (включая минимальные затраты на обслуживание) проявляется на железобетонном подрельсовом основании и бесстыковом пути.

Для усиления ВСП стрелочные переводы переводят с деревянного на железобетонное основание. За последние пять лет на БЖД благодаря целенаправленной работе по улучшению надежности инфраструктуры и сокращению эксплуатационных затрат была сокращена протяженность деревянных путей более чем на 250 км.

Одной из основных задач является сокращение зависимости производства от импорта. В этом направлении отечественные предприятия осваивают производ-

ство элементов ВСП. Гомельский электромеханический завод (ЭМЗ) выпускает наборы подкладок для стрелочных переводов, позволяющих сменить деревянные переводные брусья на железобетонные без замены металлических элементов.

Барановичский завод освоил выпуск болтов для рельсовых стыков, а также проводит сертификацию стыковых накладок. Гомельским ЭМЗ совместно с Осиповичским заводом железобетонных конструкций (ЖБК) была улучшена конструкция рельсового скрепления типа СБ, что позволяет укладывать железобетонные шпалы на кривых участках пути радиусом менее 350 метров. Это также создает необходимые условия для замены основания стрелочных переводов и путей, включая искусственные сооружения, с деревянных на железобетонные.

В Центре механизации путевых работ разработано и прошло опытную эксплуатацию устройство для предварительного подогрева рельсов, что позволяет значительно снизить затраты по сравнению с аналогичными решениями других производителей.

Наряду с проведением восстановительного ремонта железнодорожного пути одной из наиболее трудо- и материально затратных работ является смена стрелочных переводов.

Анализ стрелочного хозяйства. Причиной замены практически всех стрелочных переводов, указанных на рисунке 1, ввиду значительной разницы в сроке службы деревянного основания и металлических частей, является негодное для эксплуатации подрельсовое основание, в то время как состояние металлических элементов удовлетворяет требованиям для II группы годности (главные пути 3-го и 4-го классов).

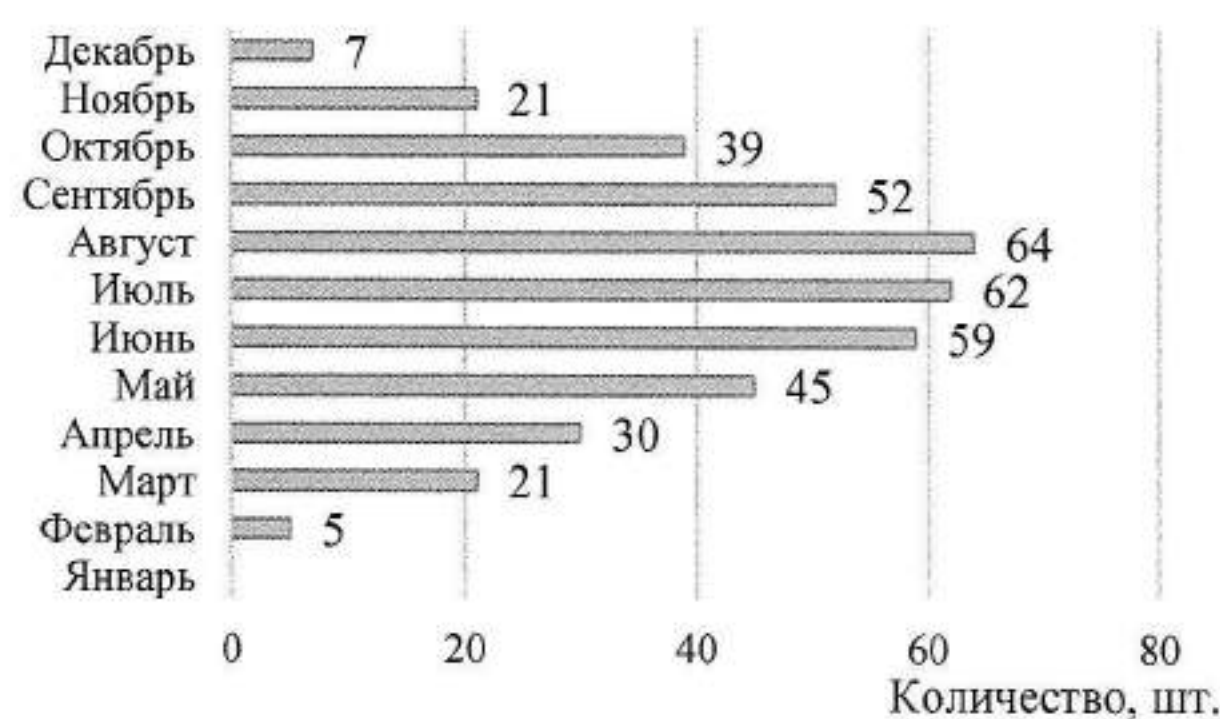


Рисунок 1 – Программа по замене стрелочных переводов БЖД на 2025 год

В таком состоянии их дальнейшая эксплуатация приводит к существенным трудностям. Одиночная замена деревянных брусьев на железобетонные вызывает большой объем трудозатрат, а комплексная замена непосредственно на месте стрелочного перевода – значительную продолжительность «окна».

Обеспечение установленного срока службы стрелочных переводов, а также возможности его продления во многом определяются состоянием подрельсового основания [1]. Обеспечить продление, а зачастую выработку полного срока эксплуатации деревянных переводных брусьев становится невозможным из-за появления в древесине трещин и загнивания, в результате чего рельсовая колея перестает быть стабильной (таблица 1).

Таблица 1 – Анализ основных показателей деревянных и железобетонных переводных брусьев

Показатель	Переводные брусья	
	деревянные	железобетонные
Срок службы	5–8 лет	35 лет
Устойчивость к гниению	Древесина требует пропитки, разрушается от влаги и грибка	Абсолютная устойчивость к гниению
Механическая прочность	Низкая (подвержены растрескиванию, деформациям)	Высокая (устойчивы к динамическим нагрузкам)
Стоимость комплекта, руб.	I типа – 13 225 II типа – 11 328	11 220
Установка и монтаж	Быстрый монтаж	Требует спецприспособлений
Вес конструкции, кг	60–80	250–300
Вибрация и шумопоглощение	Лучше гасит вибрацию, меньше шума	Жесткая конструкция, больше шума и вибрации
Устойчивость к температурным перепадам	Подвержены короблению при перепадах влажности и температуры	Устойчивы к любым температурам
Огнестойкость	Низкая	Высокая
Экологичность	Натуральный материал, но с химической пропиткой	Бетон и металл менее экологичны при производстве
Требования к балласту	Любой род балласта	Требуются качественный уплотненный балласт
Частота обслуживания	Частое	Редкое (основной контроль – трещины в бетоне)
Устойчивость к боковым нагрузкам	Ограниченная	Высокая
Способ крепления рельсов	ДО	КБ, СБ-3
Возможность регулировки	Легкая регулировка по высоте	Требуются подкладка прокладок
Трудоемкость монтажа, чел·ч	2	5
Возможность повторного использования	Ограниченная (практически не применяется)	Возможен повторный монтаж

Окончание таблицы 1

Показатель	Переводные брусья	
	деревянные	железобетонные
Усадка материала, % за первые 2 года	До 3–5	Практически отсутствует
Электропроводность	Низкая (лучшая изоляция)	Высокая (требуется изоляция)
Возможность утилизации	Полная биоразлагаемость	Требуется дробление
Влияние на почву	Возможно загрязнение	Нейтральное
Интервал между подбивками, мес.	3–6	2–18

Вариативные подходы организации путевого хозяйства для обеспечения возможности достижения полного срока выработки стрелочных переводов, а при возможности – его продления:

– уменьшение скорости движения поездов с целью снижения динамического воздействия от подвижного состава;

– перекладка элементов стрелочных переводов с путей более высокого класса на низкий;

– в случаях, когда металлические элементы удовлетворяют требованиям соответствующих групп годности – комплексное обновление стрелочных переводов за счет сплошной замены комплекта переводных брусьев [2].

Последний вариант стал возможным для реализации с 2022 года за счет использования комплектов стрелочных башмаков, разработанных Гомельским ЭМЗ.

Технология по перекладки стрелочного перевода с заменой деревянного основания железобетонным. Несмотря на значительные преимущества деревянных брусьев, их основным недостатком является малый срок эксплуатации, а следовательно, высокие расходы на текущее содержание.

Согласно срокам эксплуатации брусьев (в среднем: деревянных – 7 лет, железобетонных – 35 лет), можно определить, что на период службы одного комплекта железобетонных брусьев приходится порядка 5 комплектов деревянных брусьев.

Первоначальная стоимость новых брусьев практически одинаковая, поэтому при определении материальных расходов в течение жизненного цикла не учитывалась. Таким образом, за один жизненный цикл железобетонных брусьев, стоимость деревянного основания с учетом необходимости их неоднократной замены составит с брусьями I и типа II соответственно:

$$13\,225 \cdot (35 / 7) = 66\,125 \text{ руб.};$$

$$11\,328 \cdot (35 / 7) = 56\,640 \text{ руб.}$$

Отношение стоимости железобетонных и деревянных брусьев с брусьями I и типа II соответственно составит 589 и 504 %.

Основной работой для поддержания стрелочного перевода в надлежащем состоянии в течение 35 лет, в рамках текущего содержания, будет одиночная смена переводных брусьев. Для оценки трудоемкости производства работ применяются типовые нормы времени [3], рассчитываемые по формуле

$$T = T_{\text{оп}} \left(1 + \frac{T_{\text{пз}} + T_{\text{об}} + T_{\text{отл}}}{100} \right),$$

где T – норма времени, чел·мин; $T_{оп}$ – оперативное время, в течение которого работником выполняется производственное задание, чел·мин; $T_{пз}$, $T_{об}$, $T_{отл}$ – норматив, учитывающий время на подготовительно-заключительные работы, обслуживание рабочего места, отдых и личные надобности, %.

Для работ по текущему содержанию пути установлены $T_{пз}$, $T_{об}$ и $T_{отл}$ соответственно 3, 4, 1,1 и 5,1 %.

Трудовые затраты зависят от вида бруса: подстрелочные, промежуточные, подкрестовинные и закрестовинные, так как они различные по длине и количеству закреплений рельсов [4]. При выполнении работ тремя монтерами пути $T_{оп}$, чел·мин/брус, составит, согласно [3], для брусьев:

- подстрелочных – 97,89;
- промежуточных – 112,50;
- подкрестовинных – 136,27;
- закрестовинных – 129,67.

С учетом нормативов времени на $T_{пз}$, $T_{об}$ и $T_{отл}$ общие типовые нормы времени, чел·мин/брус,

$$\begin{aligned} 97,89 + 3,33 + 1,08 + 4,99 &= 107,29; \\ 112,5 \cdot 3,83 + 1,24 + 5,74 &= 123,31; \\ 136,27 + 4,63 + 1,50 + 6,95 &= 149,35; \\ 129,67 + 4,41 + 1,43 + 6,61 &= 142,12. \end{aligned}$$

На переводе типа Р65 марки 1/11 расположено 18 подстрелочных, 29 промежуточных, 9 подкрестовинных и 12 закрестовинных брусьев соответственно:

$$\begin{aligned} 107,29 \cdot 18 &= 1931,22 \text{ чел·мин} : 60 = 32,2 \text{ чел·ч}; \\ 123,31 \cdot 29 &= 3575,99 \text{ чел·мин} : 60 = 59,6 \text{ чел·ч}; \\ 149,35 \cdot 9 &= 1344,15 \text{ чел·мин} : 60 = 22,4 \text{ чел·ч}; \\ 142,12 \cdot 12 &= 1705,44 \text{ чел·мин} : 60 = 28,4 \text{ чел·ч}. \end{aligned}$$

Общие трудовые затраты составят 142,6 чел·ч/комплект.

В настоящее время на БЖД эксплуатируется порядка 7000 стрелочных переводов на деревянных брусьях, что составляет, в среднем, 350 единиц на одну ПЧ.

С учетом разницы во времени эксплуатации, можно предположить, что трудовые затраты на содержание, без учета выправочных работ, стрелочных переводов на деревянном, по сравнению с железобетонным, основании

$$\begin{aligned} 350 \cdot 142,6 \cdot 5 &= 249\,550 \text{ чел·ч/35 лет}; \\ 249\,550 : 35 &= 7130 \text{ чел·ч/год} : 350 = \\ &= 20,4 \text{ чел·ч/год на 1 комплект}. \end{aligned}$$

При пятидневной рабочей неделе количество рабочих дней в 2025 году – 252, таким образом, трудовые затраты составят $7130 : 252 = 28,3$ чел·ч/день. При восьмичасовом рабочем дне потребуется занятость $28,3 : 8 = 3,5 = 4$ чел.

С учетом климатических факторов (например, смена в зимнее время невозможна из-за смерзаемости

Получено 20.10.2025

V. V. Romanenko, N. A. Gorban. Evaluation of the effectiveness of technology for replacing switches with strengthened underrailing.

The article discusses current technologies used in replacing the under-rail base on the Belarusian Railway, analyzes modern materials and methods that increase the durability and reliability of switchgear, evaluates the implementation of technology for rearranging switchgear with reinforcement of the under-rail base, and its impact on the overall life cycle of switchgear. The article also analyzes the economic aspects of using technological solutions and the potential for reducing operating costs.

балласта), потребность в количестве монтеров возрастает до 5–6 человек.

В существующих условиях выделение в каждой ПЧ шести человек каждый день только на содержание деревянных переводных брусьев практически невозможно, что влечет за собой снижение качества стрелочных переводов и, следовательно, уровня безопасности движения поездов.

Согласно рисунку 1 количество заменяемых стрелочных переводов составляет 405 единиц, в том числе в Гомельской дистанции пути – 54 стрелочных переводов на деревянном основании. На всех переводах металлические элементы находятся в состоянии, пригодном для эксплуатации, а применение комплектов стрелочных башмаков Гомельского ЭМЗ позволяет заменить только подрельсовое основание на железобетонное.

Для оптимизации производства работ разрабатывается схема перекладки переводов в пределах всей ПЧ с учетом марки, сторонности и условий эксплуатации. Схема позволяет комплексно (крупными блоками с применением путевой техники) снимать стрелочный перевод на деревянном основании, вместо которого укладывается перевод на новых железобетонных брусьях. Работы выполняются в «окно», что существенно сокращает трудовые затраты по сравнению с одиночной заменой.

Снятый перевод на деревянном основании транспортируют на производственную базу ПЧ, где производят замену всего комплекта деревянных брусьев новыми железобетонными. Собранным переводом заменяется следующий однотипный, подходящий по параметрам стрелочный перевод и т. д.

Таким образом, перекладка 54 стрелочных переводов с усилением подрельсового основания позволит сократить эксплуатационные расходы:

- трудовые затраты при занятости 6 монтеров на 1101,6 чел·ч ($20,4 \cdot 54 = 1101,6$ (184 рабочих дня));
- материальные затраты для брусьев I и II типов – соответственно на 66 125 и 56 640 руб.

Список литературы

- 1 СТП 09150.56.010-2005. Текущее содержание железнодорожного пути. Технические требования и организация работ : утв. приказом Нач. Бел. ж. д. от 29.06.2006 № 221 Н. – Введ. 01.07.06. – Минск : Белорусская железная дорога, 2006. – 290 с.
- 2 Романенко, В. В. Комплексные меры по сокращению расходов на содержание стрелочных переводов / В. В. Романенко // Рынок транспортных услуг (проблемы повышения эффективности : междунар. сб. науч. трудов ; под ред. В. Г. Гизатуллиной. – Гомель : БелГУТ, 2023. – Вып. 16. – 219–226.
- 3 Типовые технические обоснованные нормы времени на работы по текущему содержанию пути : утв. приказом Нач. Бел. ж. д. от 08.04.2020 № 129 Н. – Введ. 01.08.20. – Минск : Белорусская железная дорога, 2015. – 299 с.
- 4 Романенко, В. В. Ресурсный подход к анализу содержания стрелочных переводов / В. В. Романенко // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов : материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию БелИИЖТа – БелГУТа. В 2 ч. Ч. 1. – Гомель : БелГУТ, 2023. – С. 411–413.

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ

УДК 627.42.07.:00458.5

В. В. БУРЧЕНКОВ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, В. М. ЧУМАКОВ, Белорусская железная дорога, г. Минск

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИНФОРМАЦИИ О ТИПЕ БУКСОВЫХ УЗЛОВ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ГРЕЮЩИХСЯ БУКС

Рассмотрены признаки распознавания роликовых и кассетных букс вагонных колес в классах нормально греющихся и перегретых букс. Оценена информативность выявления греющихся букс и достоверность измерительной информации в условиях движения поездов. Исследовано распределение плотностей вероятностей значений превышения температуры для роликовых и кассетных букс. Определены оптимальные пороговые значения температуры при обнаружении перегретых букс и минимизация вероятности ошибки распознавания греющихся буксовых узлов. Формализованы показатели качества работы комплексов КТСМ для комплектования баз информационно-измерительных данных в системе АСК ПС.

Для буксовых узлов вагонных колес в условиях эксплуатации характерны разрывы и сколы бортов внутренних колец подшипников, проворот их на шейке оси, разрушение сепараторов, обводнение и загрязнение смазки (песок, металлическая пыль и стружка) и др. Все перечисленные виды неисправностей приводят к нагреву шейки вагонной оси и деталей буксового узла в процессе движения поезда.

Для объективной оценки точности и достоверности измерения энергии инфракрасного излучения буксовых узлов грузовых вагонов в движении разработана методика оценки влияния информации о типе буксового узла вагонов на точность автоматической классификации греющихся букс [1].

До настоящего времени информативность различных признаков распознавания греющихся букс периферийной аппаратурой автоматического контроля букс в целом исследовалась без учёта типа контролируемых буксовых узлов и типа вагонов. Опыт эксплуатации аппаратуры обнаружения перегретых букс показал, что это приводит к дополнительным потерям информационной способности аппаратуры, которые выражаются в увеличении вероятности ошибки распознавания греющихся букс, т. е. приводят к дополнительным необоснованным остановкам поездов на перегоне (из-за ложных показаний аппаратуры) и пропускам аварийно греющихся букс. Это происходит потому, что допустимый нагрев кассетных букс с подшипниками конического типа в 1,5–1,8 раза выше нагрева роликовых букс, и при настройке аппаратуры на обнаружение перегретых роликовых букс часть исправных, но имеющих повышенный нагрев, кассетных букс при автоматическом распознавании может быть отнесена к классу перегретых букс [2].

Постоянно растущее число вагонов с кассетными буксами актуализировало разработку методики оценки влияния информации о типе буксовых узлов вагонов на точность автоматической классификации греющихся букс, выполненной на основе законов распределения плотности вероятности признака распознавания роликовых и кассетных букс в классах нормально греющихся и перегретых букс.

Под информативностью признака распознавания греющихся букс подразумевается его способность к правильной классификации букс, т. е. способность признака правильно классифицировать всё множество контролируемых букс на два подмножества (класса): нормально греющихся (Н) и перегретых (П) букс [3]. При обозначении априорной вероятности нормально греющейся буксы $P(H)$, вероятности перегретой $P(\Pi)$, можно формализовать вероятность правильного отнесения нормально греющихся букс к классу нормально греющихся букс, как $P(H/H)$, а вероятность правильного отнесения перегретой буксы к классу перегретых букс $P(\Pi/\Pi)$. Тогда вероятность правильной классификации букс $P_{ПКБ}$ будет иметь вид:

$$P_{ПКБ} = P(H)P(H/H) + P(\Pi)P(\Pi/\Pi).$$

Однако в практике аппаратного контроля букс информативность признака принято характеризовать вероятностью ошибки при классификации букс. Если считать, что вероятности правильного и неправильного отнесения нормально греющихся (перегретых) букс к классу нормально греющихся (перегретых) букс образуют полную совокупность событий, то вероятность ошибки при автоматическом распознавании греющихся букс

$$P_{ош} = P(H)[1 - P(H/H)] + P(\Pi)[1 - P(\Pi/\Pi)].$$

Вероятность $[1 - P(H/H)]$ принято называть вероятностью «ложной тревоги» $P_{лт}$, т. е. вероятностью ошибочного отнесения нормально греющейся буксы к классу перегретых букс, а вероятность $[1 - P(\Pi/\Pi)]$ – вероятностью пропуска перегретой буксы, или вероятностью ошибочного отнесения перегретой буксы к классу нормально греющихся букс.

Для того чтобы оценить, насколько полно реализованы в аппаратуре контроля букс информативные возможности признака распознавания, необходимо знать его потенциальную (предельную) информативность.

Превышение температуры корпуса буксы над температурой окружающей среды $\Delta T_{кб}$ зависит от солнечной радиации, термического сопротивления его при передаче тепла от подшипника к корпусу, наличия влаги на поверхности буксы и других факторов. Целесообразно исследовать распределение плотностей ве-

роятностей $P(\Delta T_{кб})$ значений превышения температуры $\Delta T_{кб}$ для роликовых и кассетных букс.

Распределение плотностей вероятностей $P(\Delta T_{кб})$ реальных значений превышения температуры корпуса буксы над температурой окружающей среды $\Delta T_{кб}$ для нормальных (кривая 1) и перегретых (кривая 2) роликовых букс с подшипниками качения, а также для перегретых букс кассетного типа (кривая 3) показано на рисунке 1.

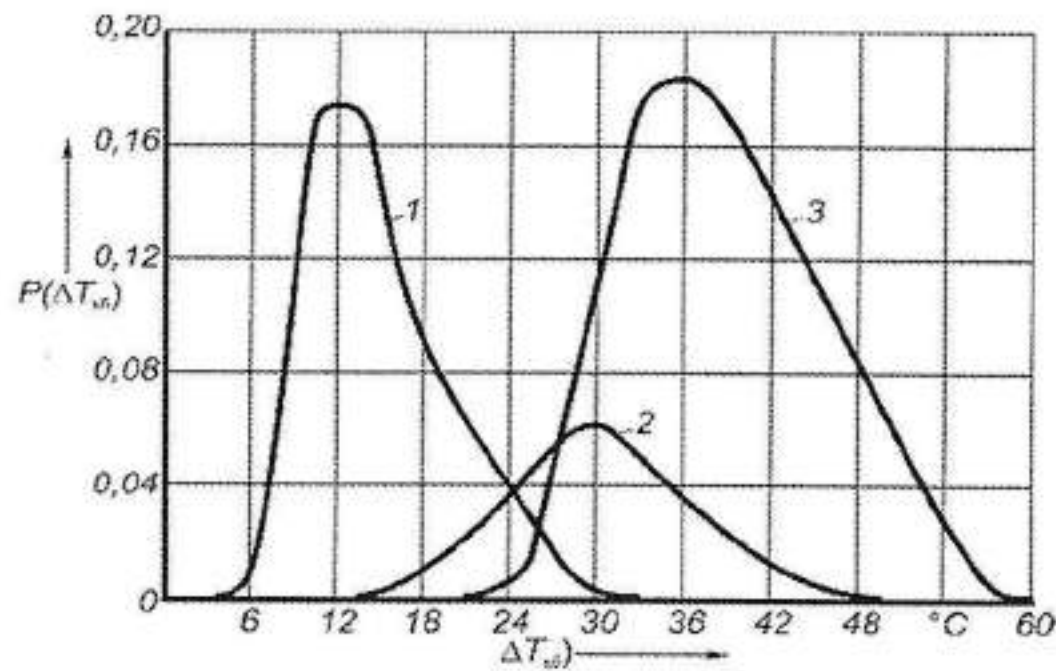


Рисунок 1 – Распределение значений $P(\Delta T_{кб})$ для роликовых букс с подшипниками качения и букс кассетного типа с коническими подшипниками

Установлено, что множества значений $P(\Delta T_{кб})$ для нормально работающих и перегретых роликовых букс имеют зону пересечения от 14 до 32 °С. Множества значений $P(\Delta T_{кб})$ для перегретых букс кассетного типа также присутствуют в указанной зоне пересечений. Это говорит о невозможности безошибочного распознавания перегретых букс по значению $\Delta T_{кб}$. При нахождении измеренного значения $\Delta T_{кб}$ в этой зоне, определенное количество перегретых букс будет не обнаружено, и наоборот, определенное количество нормально греющихся букс будет принято за перегретые [1].

Из изложенного следует, что требуемая достоверность обнаружения перегретых букс будет успешной лишь при использовании совокупности статистических и инструментальных методов обработки результатов измерений.

Способность правильно классифицировать всё множество контролируемых букс на два подмножества (класса) базируется на точном распознавании нормально греющихся (Н) и перегретых (П) букс.

Под потенциальной информативностью признака принято считать минимум ошибки при распознавании, которая может быть достигнута в условиях отсутствия помех с использованием максимального количества априорной информации о признаке распознавания. В этом случае

$$P_{ош} = P(Н)P_{лт} + P(П)P_{пр}, \quad (1)$$

где $P_{ош}$ – вероятность ошибки при автоматическом распознавании греющихся букс; $P_{лт}$ – вероятность ложной тревоги; $P_{пр}$ – вероятность пропуска перегретой буксы.

Закон распределения плотности вероятности признака нормально греющихся букс в этом случае

$$W_{11}(X_i) = P(Н_p)W_{11p}(X_i) + P(Н_k)W_{11k}(X_i), \quad (2)$$

$$\text{где } \left. \begin{matrix} P(Н_p), \\ P(Н_k) \end{matrix} \right\}, \left. \begin{matrix} W_{11p}(X_i), \\ W_{11k}(X_i) \end{matrix} \right\} - \text{вероятности появления ро-$$

ликовых и кассетных букс в классе нормально греющихся букс и законы распределения плотности вероятности признака распознавания (X_i) нормально греющихся роликовых и кассетных букс, а признак распознавания перегретых букс

$$W_{12}(X_i) = P(П_p)W_{12p}(X_i) + P(П_k)W_{12k}(X_i), \quad (3)$$

$$\text{где } \left. \begin{matrix} P(П_p), \\ P(П_k) \end{matrix} \right\}, \left. \begin{matrix} W_{12p}(X_i), \\ W_{12k}(X_i) \end{matrix} \right\} - \text{вероятности появления ролико-$$

вых и кассетных букс в классе перегретых букс и законы распределения плотности вероятности признака распознавания (X_i) перегретых роликовых и кассетных букс [4].

Подставляя выражения (2) и (3) в формулу (1), получим вероятности ошибок распознавания с учётом того, что множества нормально греющихся и перегретых букс состоят из подмножества букс с разного типа подшипниками:

$$P_{ош}(X_i) = P(Н) \left[P(Н_p) \int_{X_{i0}}^{\infty} W_{11p}(X_i) dX_i + P(Н_k) \int_{X_{i0}}^{\infty} W_{11k}(X_i) dX_i \right] + \\ + P(П) \left[P(П_k) \int_{-\infty}^{X_{i0}} W_{12k}(X_i) dX_i + P(П_p) \int_{-\infty}^{X_{i0}} W_{12p}(X_i) dX_i \right].$$

Взяв от полученного выражения производную и приравняв её к нулю, получим уравнение

$$P(Н) \left[P(Н_p)W_{11p}(X_i) + P(Н_k)W_{11k}(X_i) \right] - \\ - P(П) \left[P(П_k)W_{12k}(X_i) + P(П_p)W_{12p}(X_i) \right] = 0,$$

корнем которого является пороговое значение признака X_{i0} , минимизирующее вероятность ошибок при условии, что тип буксового узла не распознаётся.

Обозначим: $P_{пкр}$ – вероятность того, что нормально греющаяся роликовая букса отнесена к кассетным буксам; $P_{прк}$ – вероятность того, что нормально греющаяся кассетная букса отнесена к роликовым; $P_{пкп}$ – вероятность того, что перегретая кассетная букса отнесена к роликовым; $P_{пкк}$ – вероятность того, что перегретая роликовая букса отнесена к кассетным и найдем общую вероятность ошибочного решения

$$P_{ош}(X_{i1}, X_{i2}) = P_p P(Н_p) P_{пкр}(X_{i1}, X_{i2}) + P_k P(Н_k) P_{прк}(X_{i1}, X_{i2}) + \\ + P_k P(П_k) P_{пкк}(X_{i1}, X_{i2}) + P_p P(П_p) P_{пкп}(X_{i1}, X_{i2}). \quad (4)$$

Используя уравнения (3) и (4) и опустив промежуточные преобразования, получим систему уравнений

$$P_{ош}(X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}) = P_p P(Н_p) \left[K_1 \int_{X_{i01}}^{\infty} W_{11p}(X_j) dX_j \int_{X_{i01}}^{X_{i02}} W_{11p}(X_i) dX_i + K_2 \int_{X_{i01}}^{\infty} W_{11p}(X_i) dX_i \right] + \\ + P_k P(Н_k) \left[K_3 \int_{X_{i01}}^{\infty} W_{11k}(X_j) dX_j \int_{X_{i01}}^{X_{i02}} W_{11k}(X_i) dX_i + K_4 \int_{X_{i01}}^{\infty} W_{11k}(X_i) dX_i \right] + \\ + P_k P(П_k) \left[K_5 \int_{-\infty}^{X_{i01}} W_{12k}(X_i) dX_i + K_6 \left[1 - \int_{X_{i01}}^{\infty} W_{12k}(X_j) dX_j \right] \int_{X_{i01}}^{X_{i02}} W_{12k}(X_i) dX_i \right] + \\ + P_p P(П_p) \left[K_7 \int_{-\infty}^{X_{i01}} W_{12p}(X_i) dX_i + K_8 \left[1 - \int_{X_{i01}}^{\infty} W_{12p}(X_j) dX_j \right] \int_{X_{i01}}^{X_{i02}} W_{12p}(X_i) dX_i \right], \quad (5)$$

где $\left. \begin{matrix} W_{пр}(X_j), \\ W_{пр}(X_j) \end{matrix} \right\}$ – распределения плотности вероятности признака селекции типа подшипника для нормально греющихся и перегретых роликовых букс соответственно;

$\left. \begin{matrix} W_{нк}(X_j), \\ W_{нк}(X_j) \end{matrix} \right\}$ – то же для кассетных букс.

Корни системы уравнений (5) являются пороговыми значениями разделяющих функций, минимизирующих вероятность суммарной ошибки при распознавании греющихся букс. Данная система полученных уравнений позволяет одновременно находить оптимальные пороговые значения признаков при обнаружении перегретых букс и их селекции по типам и минимизировать вероятность ошибки распознавания греющихся букс:

На рисунке 2 показана рассчитанная по формуле (5) динамика оптимального порога обнаружения перегретых букс при увеличении числа кассетных букс в поездах и отсутствии распознавания их по типу (кривая 1).

Видно, как по мере роста вероятности появления кассетной буксы оптимальный порог распознавания смещается от оптимального порога обнаружения перегретых роликовых букс (кривая 2) к оптимальному порогу обнаружения перегретых кассетных букс (кривая 3), которые не зависят от изменения соотношений кассетных букс и роликовых букс в поездах.

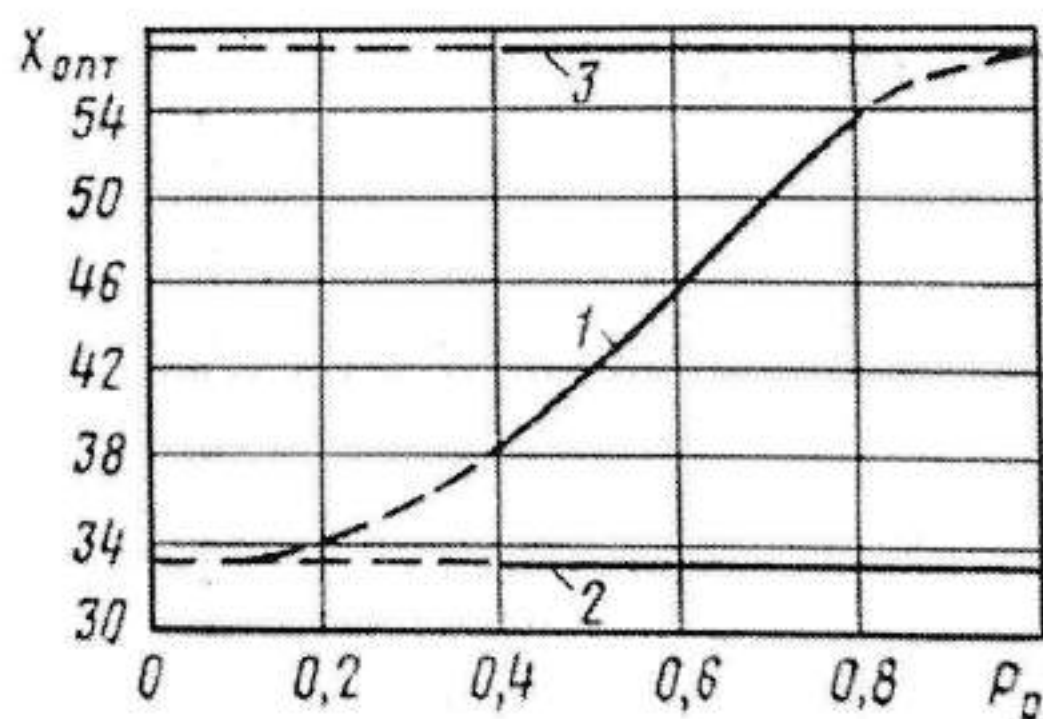


Рисунок 2 – Влияние вероятности появления кассетной буксы на порог обнаружения перегретых букс при отсутствии информации о типе буксы (1), оптимальный порог обнаружения для роликовых букс (2) и кассетных букс (3)

Результаты выполненных исследований позволили установить, что при автоматическом обнаружении перегретых букс целесообразно проводить селекцию букс по их типу, поскольку учёт информации о типе буксы уменьшает вероятность ошибки при выявлении перегретых букс почти в 2 раза. Более адекватная оценка состояния разнотипных буксовых узлов возможна при комбинированном использовании браковочных значений температур и инструментальных методов определения типа буксовых узлов.

В настоящее время на Белорусской железной дороге внедряется аппаратура нового поколения КТСМ-03, имеющая ряд инновационных технических решений, в том числе повышенный уровень классификации типов буксовых узлов. Применен процессор

ARM Cortex-M4, 32 бит, 168 МГц, а также ПЗУ – 2 Мбайт и ОЗУ – 16 Мбайт. Аппаратура функционирует в системе Ethernet RS232 со скоростью передачи до 115200 бит/с. На рисунке 3 представлена схема ориентации напольных камер КНМ-05, применяемых в комплексах КТСМ-02, и камер КНМ-90, используемых в комплексах КТСМ-03 [1, 4].

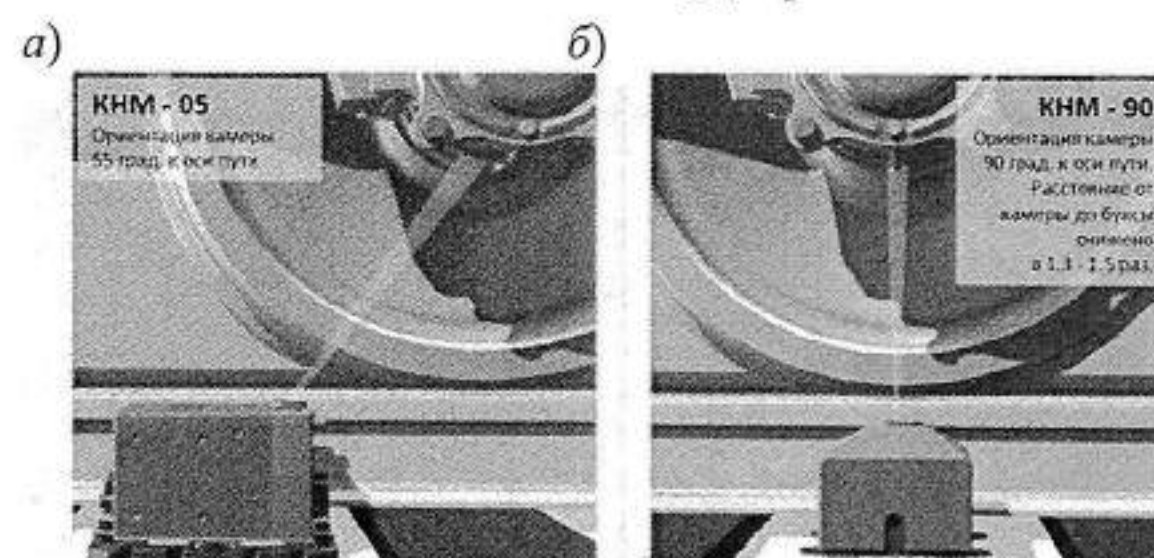


Рисунок 3 – Ориентация напольных камер КНМ-05 (а) и камер КНМ-90 (б) на контролируемую зону буксовых узлов

Установлено, что приемники инфракрасного излучения камер КНМ-90 приближены к наиболее информативной зоне контроля букс. Расстояние от напольной камеры до буксы снижено в 1,3–1,5 раза.

На рисунке 4 показаны зоны сканирования температуры буксовых узлов камерами КНМ-90 в комплексах КТСМ-02 и КТСМ-03.

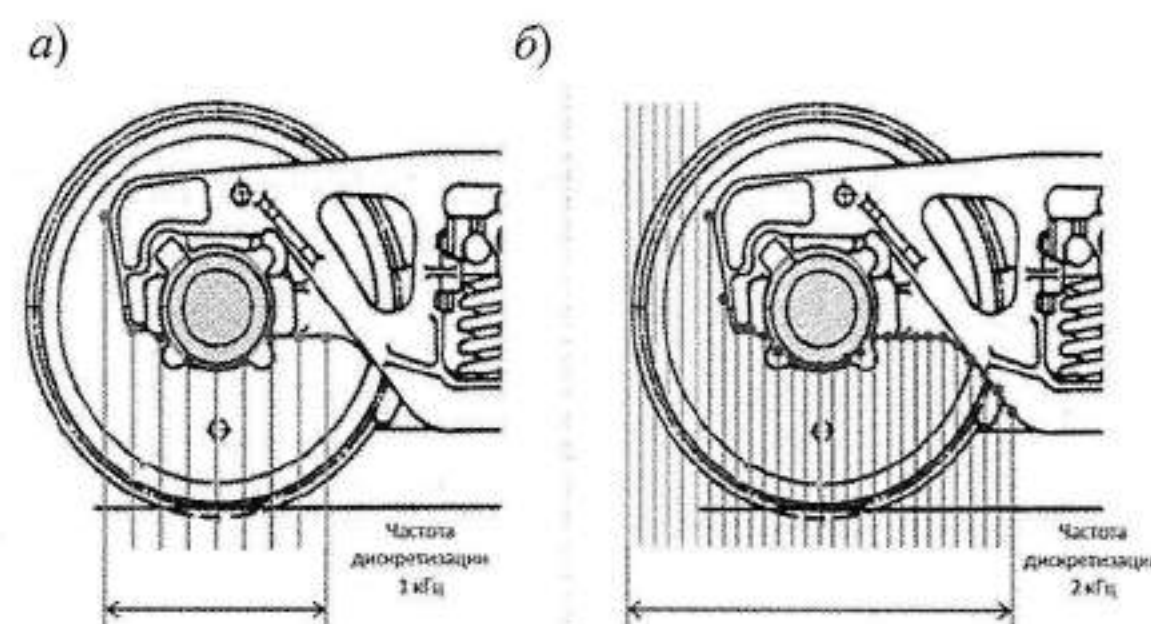


Рисунок 4 – Зоны сканирования температуры буксовых узлов камерами КНМ-90 в комплексах: а – КТСМ-02; б – КТСМ-03

Отмечено, что увеличение частоты дискретизации сигналов считывания инфракрасного излучения безынерционным приемником фотонного типа с 1 до 2 кГц, а также ориентация приемников инфракрасного излучения на наиболее информативную зону контролируемой буксы существенно повышает точность измерения температуры буксовых узлов. Применен новый алгоритм распознавания кассетных букс и идентификации подвижного состава [1, 5].

Для практического применения и формирования баз информационно-измерительных данных в системе АСК ПС более пригодны показатели, по которым оценивается качество работы комплексов КТСМ. К ряду этих показателей относятся «выявляемость» перегретых букс (η), «подтверждаемость» (достоверность) показаний аппаратуры (β) и вероятность необоснованных остановок поезда из-за ложных показаний аппаратуры (α). Перечисленные показатели связаны с уже рассмотренными показателями ($P_{лт}$, $P_{пр}$) и между собой [6, 7].

Под «выявляемостью» перегретых букс принято считать выраженное в процентах отношение числа выявленных аппаратурой действительно (подтвержденных осмотром) перегретых букс N_v к общему количеству перегретых букс $N_{\text{фп}}$, обнаруженных в поездах за определенный интервал времени, т. е.

$$\eta = \frac{N_v}{N_{\text{фп}}} \cdot 100 = \frac{N_{\text{фп}} - N_{\text{пр}}}{N_{\text{фп}}} \cdot 100 = \left(1 - \frac{N_{\text{пр}}}{N_{\text{фп}}}\right), \quad (6)$$

где $N_{\text{пр}}$ – число пропущенных аппаратурой перегретых букс.

При большом числе проконтролированных букс отношение $N_{\text{пр}} / N_{\text{фп}}$ стремится к вероятности пропуска перегретой буксы $P_{\text{пр}}$ и выражение (6) можно записать в виде

$$\eta = (1 - P_{\text{пр}}) \cdot 100. \quad (7)$$

Соотношение (7) устанавливает связь между эксплуатационным показателем «выявляемости» и «теоретическим» показателем – вероятностью пропуска перегретой буксы.

«Подтверждаемость» показаний – это отношение числа выявленных аппаратурой фактически перегретых букс N_v к общему числу букс, показанных аппаратурой как перегретые $N_{\text{покс}}$

$$\beta = \frac{N_v}{N_{\text{покс}}} \cdot 100 = \frac{N_v}{N_v + N_{\text{лт}}} \cdot 100, \quad (8)$$

где $N_{\text{лт}}$ – число нормально греющихся букс, показанных аппаратурой как перегретые.

Число выявленных аппаратурой перегретых букс

$$N_v = P(\Pi)\eta N_o, \quad (9)$$

где N_o – общее число букс, проконтролированных аппаратурой за определённый интервал времени.

Число ложных показаний аппаратуры

$$N_{\text{лт}} = P(\text{H})P_{\text{лт}}N_o. \quad (10)$$

Подставляя (8) и (9) в (10), после преобразований получим соотношение между показателями «подтверждаемости» и «теоретическими» показателями информативности:

$$\beta = \frac{(1 - P_{\text{пр}}) \cdot 100}{1 - P_{\text{пр}} + \frac{P_{\text{лт}}}{\lambda_o}} = \frac{\eta}{\eta + \frac{P_{\text{лт}}}{\lambda_o}} \cdot 100.$$

Получено 22.08.2025

V. V. Burchenkov, V. M. Chumakov Assessment of the influence of information about the type of axle boxes of freight cars on the accuracy of measurements of the temperature of heating axle boxes.

The article considers the features of recognition of roller and cassette axle boxes of wagon wheels in the classes of normally heated and overheated axle boxes. The information content of detection of heated axle boxes and the reliability of measurement information under train movement conditions are estimated. The distribution of probability densities of temperature excess values for roller and cassette axle boxes is investigated. Determination of optimal threshold temperature values when detecting overheated axle boxes and minimization of the probability of error in recognizing heated roller and cassette axle boxes. The performance indicators of the KTSM complexes for completing the databases of information and measurement data in the ASC PS system are formalized.

Вероятность необоснованной остановки поездов зависит от вероятности «ложной тревоги» и длины составов, находящихся в обращении на контролируемом участке пути. Эта вероятность необоснованной остановки поездов связана с эксплуатационными показателями «выявляемости» и «подтверждаемости» следующим соотношением:

$$\alpha = m \frac{1 - \beta}{\beta} \lambda_o \eta \cdot 100. \quad (11)$$

Приведенные формулы рекомендованы к использованию в статистических отчетах для участков Белорусской железной дороги, оснащенных комплексами КТСМ-01Д и КТСМ-02 с продленным сроком службы [8].

Список литературы

- 1 **Бурченков, В. В.** Автоматизация технического контроля и диагностики подвижного состава : монография / В. В. Бурченков ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2020. – 254 с.
- 2 **Иванова, Т. В.** Оценка предотказных состояний буксового узла грузового вагона / Т. В. Иванова, Д. Г. Налабордин // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2017. – № 1(49). – С. 46–47.
- 3 **Боряк, К. Ф.** Перспективы внедрения температурного мониторинга для диагностики технического состояния механических узлов подвижного тягового железнодорожного состава / К. Ф. Боряк, С. Л. Волков, Е. С. Шпат // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2014. – № 2. – С. 50–53.
- 4 **Миронов, А. А.** Перспективные направления совершенствования средств контроля КТСМ-02 и АСК ПС / А. А. Миронов // Автоматика, связь, информатика. – 2009. – № 1. – С. 38–41.
- 5 **Гондорев, В. А.** Современные средства диагностики подвижного состава на ходу поезда / В. А. Гондорев // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2017. – № 4. – С. 36–37.
- 6 СТП БЧ 19.314-2022 Средства теплового контроля технического состояния подвижного состава на ходу поезда. Размещение, установка и эксплуатация. – Введ. 10.08.2022. – Минск : БЖД, 2022.
- 7 Автоматизированная система контроля подвижного состава АСК ПС. Центральный пост АСК ПС. Программное обеспечение ПО ЦП АСК ПС Руководство системного программиста / Инфотекс. – Екатеринбург, 2006. – 25 с.
- 8 **Поборцев, П. Н.** Порядок пользования автоматизированной системой контроля подвижного состава (АСК ПС) от устройств ДИСК, КТСМ Белорусской железной дороги / П. Н. Поборцев, З. А. Стаховская. – Минск : Белорус. ж. д., 2008. – 76 с.

УДК 6294.023

А. В. ПОПРУКАЙЛО, магистр технических наук, Г. А. КОСТЮКОВИЧ, кандидат технических наук, ОАО «Белкард», г. Гродно; Е. В. ОВЧИННИКОВ, доктор технических наук, Гродненский государственный университет им. Я. Купалы; Д. С. КАЛЫНОВ, ООО «Викон-Авто», г. Чкаловск, Российская Федерация

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ КАРДАННОГО ВАЛА ПРИВОДА ГЕНЕРАТОРА КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ

Рассмотрены карданные валы, компенсирующие осевые перемещения и передающие крутящий момент при постоянных или переменных углах между соединяемыми агрегатами. Показано, что карданные валы должны иметь такую прочность на кручение, которая обеспечивает передачу крутящего момента без риска преждевременной поломки. Рассмотрена актуальная проблема совершенствования карданных валов, повышения их надежности и эргономичности на базе новых конструкторских решений, оптимизированных по динамическим параметрам, применяемым материалам, технологиям изготовления, сборки и эксплуатации. Представлен системный подход к созданию карданного вала нового поколения для привода генератора кондиционирования воздуха пассажирских вагонов на основе исследований в области условий эксплуатации, технологии материалов, оптимального конструирования. Показано, что по результатам исследований создана конструкция карданного вала привода генератора кондиционирования воздуха пассажирских вагонов с повышенными техническими характеристиками, которая по своим параметрам не уступает лучшим зарубежным аналогам.

Введение. Карданные валы в качестве конструктивных элементов привода широко применяются в автотракторном машиностроении и используются в качестве привода между силовым агрегатом, установленном на раме, и осевой передачей, подвешенной на упругих элементах. Оптимальный выбор конструкции карданного вала и его рациональная компоновка во многом определяют технические и эксплуатационные характеристики машин и механизмов различного функционального назначения [1]. При этом возрастающие требования к транспортной технике, а именно повышению долговечности и качеству узлов транспортных средств, в частности карданных валов, требуют создания и внедрения более совершенных их конструкций. Важными особенностями конструкций карданных валов являются:

– шарнир, который обеспечивает необходимые требования по присоединению к сопрягаемым агрегатам и передачу крутящего момента при различных угловых положениях карданного вала, возникающих в процессе его установки и эксплуатации;

– механизм изменения длины (подвижное шлицевое соединение), который обеспечивает изменение длины карданного вала и передачу крутящего момента при его эксплуатации.

Шарнир и подвижное шлицевое соединение являются элементами, имеющими наибольшие зазоры и нагрузки, обусловленные действием крутящего момента и осевых сил, и во многом определяют долговечность карданного вала.

Карданные валы представляют собой сочленение одного или нескольких шарниров и трубчатых валов. Они компенсируют осевые перемещения, а также передают вращающий момент при постоянных или переменных углах между соединяемыми валами. Существует большое число модификаций карданных валов. Различия их конструкций обуславливаются спецификой эксплуатации или значениями передаваемых крутящих моментов.

Развитие конструкций карданных валов нашло их широкое применение в различных приводах подвижного состава железных дорог: тепловозах, локомотивах, рельсовых автобусах, автотрассах, путевых машинах, пассажирских вагонах и другой железнодорожной технике. Однако при проектировании и выборе карданного вала для обеспечения его оптимальной работы в приводах подвижного состава железных дорог необходим комплексный подход, учитывающий материаловедческие, конструкторские, технологические и эксплуатационные аспекты [1–4].

Основная часть. Большинство эксплуатируемых в странах СНГ пассажирских вагонов имеют автономное электроснабжение от подвагонных генераторно-приводных установок, состоящих из привода от оси колесной пары и генератора. Такой привод применяют для вращения генератора, питающего установку кондиционирования воздуха. Наиболее распространены в настоящее время генераторно-приводные установки с креплением генератора на кузове вагона и редукторно-карданным механизмом WBA-32/2, разработанным немецкой компанией Flender, а также его отечественными аналогами ДМИ-44 и другими производителями (рисунок 1).

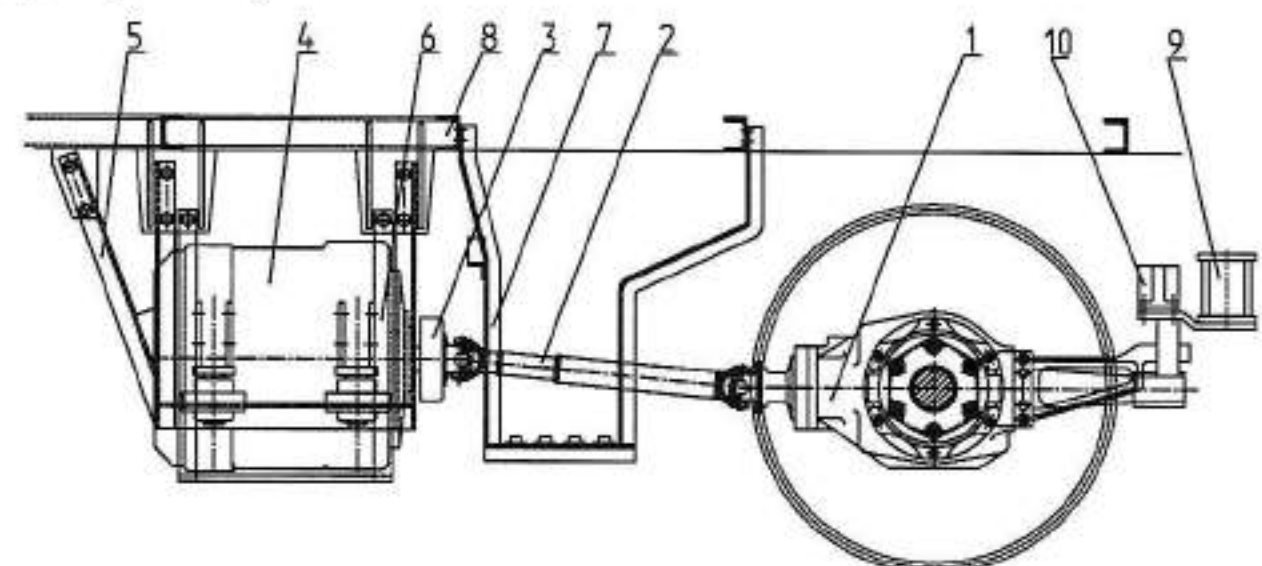


Рисунок 1 – Генераторно-приводная установка:
 1 – редуктор от средней части оси; 2 – карданный вал;
 3 – резинометаллическая муфта; 4 – генератор; 5 – подвесная рама;
 6 – предохранительная скоба; 7 – предохранительное приспособление;
 8 – рама кузова вагона; 9 – рама тележки;
 10 – опора

Эксплуатация привода типа WBA-32/2 выявила ряд существенных конструктивных недостатков, в первую очередь его низкую надежность. Статистические данные вагонных служб железных дорог показывают, что на долю этих генераторно-приводных установок приходится до 35 % всех неисправностей пассажирских вагонов, при этом 40 % из них возникают из-за разрушения элементов карданного вала. Отказы отдельных узлов карданного вала при наличии существенного дисбаланса часто становятся причиной преждевременного выхода из строя сопряженных с ним агрегатов (например, редуктора, муфты, генератора).

ОАО «Белкард» имеет достаточно большой опыт поставок карданных валов для комплектации приводов кондиционирования воздуха пассажирских вагонов. Системный анализ поставок и эксплуатации карданных валов от первой до пятой серии приводит к выводу, что основной причиной выхода их из строя является износ узлов и деталей, их составляющих. Статистика показывает, что более 80 % карданных валов выходят из строя в результате износа деталей на трение: подшипников, деталей уплотнений, шлицевых соединений, крестовин. Известно, что износ находится в прямой зависимости от скоростей, нагрузок, мощностей и режимов эксплуатации. В связи с этим возникла проблема: традиционно применяемые материалы и технологии себя исчерпали. Детали пар трения, изготовленные по традиционной технологии, не отвечают требованиям надёжности и долговечности. И это серьёзно препятствует совершенствованию и развитию новых конструкций [5–8].

В карданных валах ЖД1-4250010-06 шестой серии (рисунок 2), благодаря оптимальному использованию новых материалов и технологий, конструктивно решено множество технических проблем.

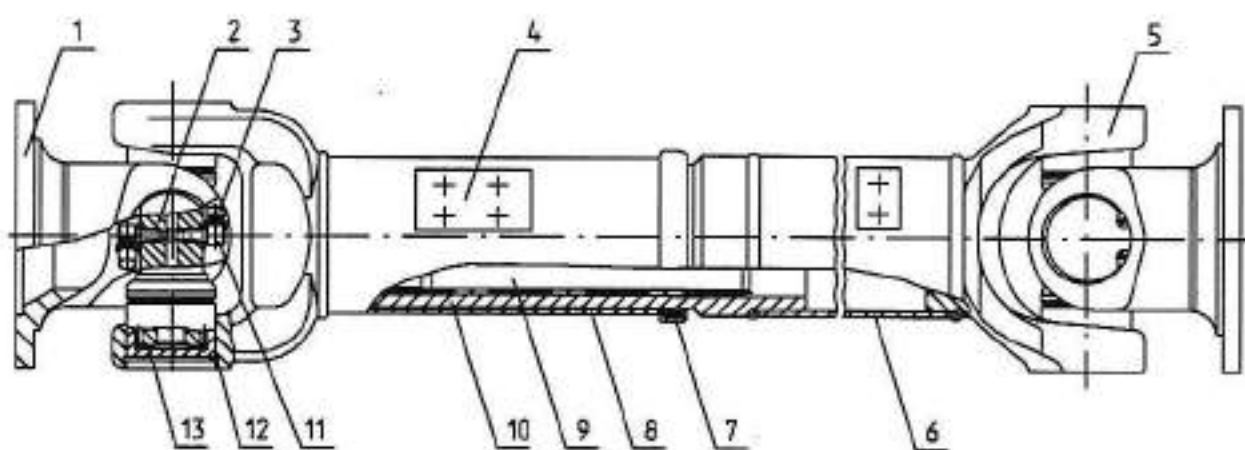


Рисунок 2 – Карданный вал ЖД1-4250010-06 шестой серии:
 1 – фланец-вилка; 2 – крестовина; 3 – колпачок масленки;
 4 – пластина балансировочная; 5 – вилка приварная;
 6 – труба карданного вала; 7 – кольцо уплотнительное;
 8 – труба телескопа; 9 – вилка скользящая; 10 – втулка шлицевая;
 11 – масленка; 12 – кольцо стопорное; 13 – подшипник игольчатый

Так как основными элементами карданного вала, во многом лимитирующими его работоспособность, являются шарнир, шлицевое соединение и элементы защиты, то и в конструкции нашло свое отражение комплексное решение этих задач.

С учётом проведённого анализа и исследований конструкция шарнира карданного вала подверглась значительным изменениям (рисунок 3).

Крепление подшипников в шарнире производится стопорными кольцами вместо болтов через крышки. Это даёт следующие преимущества:

– уменьшение веса карданной передачи за счёт ликвидации болтов, крышек, стопорных пластин, а

также за счёт оптимизации конфигурации вилок и их размеров;

– упрощение технологии изготовления деталей карданной передачи и снижение трудоёмкости их изготовления;

– снижение трудоёмкости сборки карданной передачи;

– возможность обеспечить в процессе сборки шарниров минимальных осевых зазоров в пределах (0,02–0,05) мм вместо существующих (0,1–0,22) мм, что позволяет обеспечить высокую точность при балансировке карданной передачи.

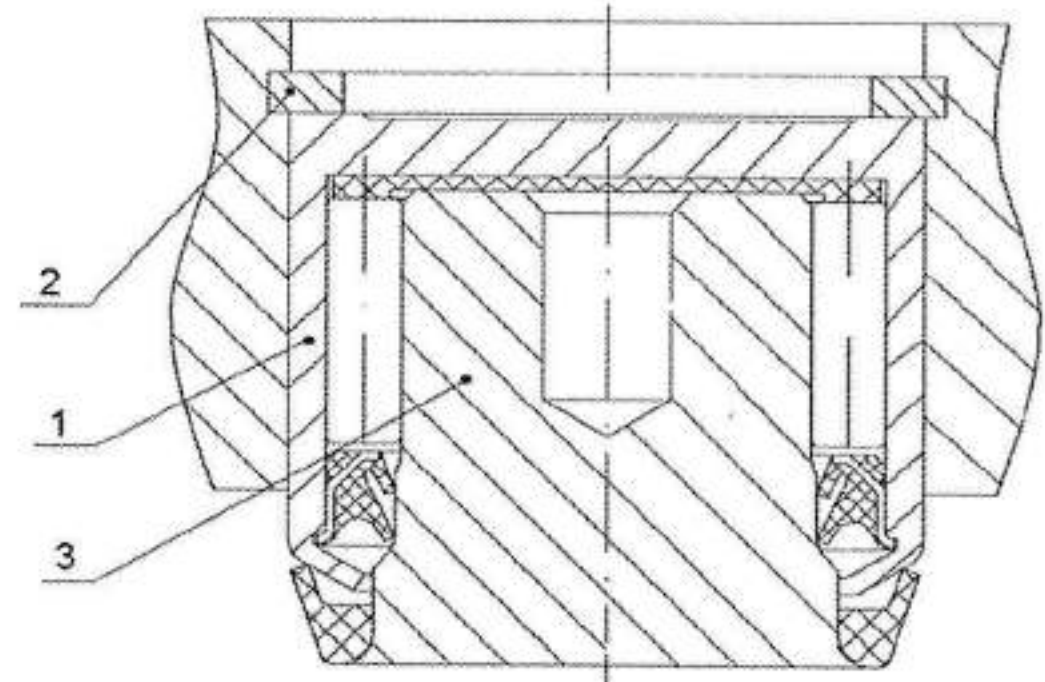


Рисунок 3 – Шарнир карданного вала:
 1 – подшипник игольчатый со встроенной полимерной шайбой;
 2 – стопорное кольцо; 3 – крестовина

Разработана принципиально новая конструкция подшипника шарнира. В конструкции применён ряд новых решений:

1 Подшипник выполнен со штампованным корпусом, что позволило при тех же габаритах подшипника повысить его грузоподъёмность и общую прочность шарнира за счёт увеличения диаметра шипа крестовины.

Между доньшком подшипника и торцом шипа крестовины устанавливается шайба из углеродонаполненного полиамида УПА-6/30. Критерием для применения в шарнирах карданных передач шайб из углеродонаполненного полиамида явились высокие физико-механические показатели углеродонаполненных полиамидов и применение их в качестве конструкционного и антифрикционного материала в различных узлах трения, работающих в условиях повышенных температур и нагрузок. Правильное конструктивное применение торцовых полимерных шайб позволяет обеспечить сохранение осевых зазоров в шарнирах в течение длительного периода эксплуатации.

2 Принципиально изменён подход к системе защиты подшипника. Вместо традиционной радиальной манжеты, работающей по цилиндрической поверхности, применено уплотнение нового типа. Это радиальное уплотнение с двумя рабочими кромками, которые работают по конусной поверхности шипа крестовины. Работа уплотнения по конусной поверхности, даже при износе рабочих кромок за счёт самоподжатия, обеспечивает качественное уплотнение подшипника. Эффект усиливает применение дополнительного торцового уплотнения. В качестве материала уплотнений применены резины с металлической арматурой. Применяемые в промышленности резиновые смеси не всегда выдерживают предъявляемые требования по износу

рабочих кромок и воздействию окружающей среды. Поэтому одним из направлений повышения надёжности является применение комбинированных уплотнений на основе полиуретановых композиций или других полимеров, обладающих высокими эксплуатационными свойствами.

3 Предусмотрена система смазки подшипника. Благоприятное соотношение смазки и трения снижает износ даже при использовании максимального угла шарнира 30° . Для обеспечения достаточного количества смазки внутри шипов крестовины предусмотрены полости для запаса смазки. Благодаря этому подшипник при обычных условиях эксплуатации не требует технического обслуживания. Для случаев нагрузок, которые делают целесообразным дозировку подшипников смазкой, это возможно сделать через пресс-маслёнку.

4 Принципиально изменена конструкция и технология изготовления крестовин шарниров карданных передач. Примером такой разработки является технология изготовления крестовин из стали пониженной прокаливаемости 60ПП, имеющей прокаливаемость более низкую, чем прокаливаемость стандартных конструкционных углеродистых сталей с равным содержанием углерода. Рассматриваемая технология объемно-поверхностной закалки была внедрена взамен технологии изготовления крестовин из легированных цементуемых сталей типа 20ХГНТР, при которой использовалась ступенчатая термообработка: предварительно механически обработанные крестовины подвергались цементации на глубину 1,5–2 мм, а затем закалывались в масле. Отпуск проводился при 200°C . Основным недостатком данного вида термической обработки применительно к крестовинам карданных передач, работающим на изгиб и кручение, является необходимость закалки на мартенсит на относительно большую глубину, достаточно высокие затраты и узкий диапазон применения крестовин по крутящему моменту. По общим требованиям после окончательной обработки крестовины карданных шарниров должны иметь твердость поверхностного слоя на цилиндрической поверхности шипов (61–67) HRC, на торцах шипов (61–66) HRC. Эффективная глубина поверхностного слоя после окончательной обработки не должна быть менее 0,8; 0,9; 1,6; 1,8 мм (в зависимости от типоразмера крестовины по крутящему моменту). При этом для получения высокой статической и усталостной прочности крестовин необходимо обеспечить наличие поверхностного высокопрочного закаленного слоя (глубина должна находиться в определенном соотношении с размерами упрочняемого сечения), упрочнение сердцевины, наличие остаточных сжимающих напряжений в поверхностных слоях деталей. Указанные требования были оптимально достигнуты с применением стали 60ПП именно благодаря применению объемно-поверхностной закалки при глубинном индукционном нагреве. Особенностями этого метода является то, что глубина нагрева до надкритических температур больше, чем требуемая толщина закаленного слоя (при этом упрочняемые элементы прогреваются насквозь), деталь прокаливается на меньшую

глубину, чем толщина нагретого слоя, и зона закалки на мартенсит определяется не глубиной нагрева, а прокаливаемостью стали. При этом участки детали, расположенные глубже мартенситной зоны, нагреваемые до надкритических температур, при охлаждении приобретают структуру троостита закалки и существенно упрочняются. Необходимость нагрева детали на большую глубину требует применения относительно низкой концентрации энергии в зоне нагрева: удельная мощность обычно составляет (0,05–0,2) кВт/см², скорость нагрева в области фазовых превращений находится в пределах (2–10) град/с, а время нагрева деталей (20–100) с. Это определяет относительно небольшие значения установленных мощностей индукционных установок, в среднем (0,1–0,2) кВт/см² [9].

Коренным образом изменилась конструкция шлицевого соединения карданного вала (рисунок 4).

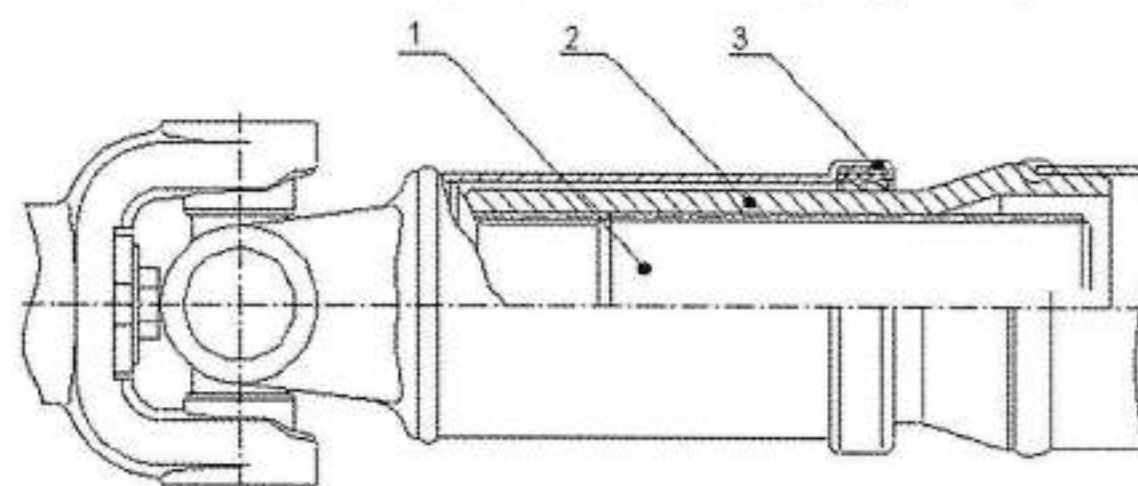


Рисунок 4 – Шлицевое соединение карданного вала с антифрикционным полимерным покрытием шлиц и телескопическим уплотнением:

1 – вилка скользящая; 2 – втулка шлицевая;
3 – телескопическое уплотнение

Как известно, одним из важнейших элементов, определяющих срок службы карданного вала, является именно шлицевое соединение, передающее крутящий момент и компенсирующее осевые перемещения при ее работе. Этот узел имеет наибольшие нагрузки крутящим моментом и осевыми силами. Износ шлицевого соединения приводит к нарушению центрирования шлицев, что вызывает вибрацию карданной передачи, отрицательно сказывающуюся на долговечности как самой карданной передачи, так и агрегатов автомобиля.

В отличие от традиционной технологии получения шлицев в конструкциях карданных валов шестой серии применены технология формообразования шлицев на вилках методом холодного пластического деформирования и технология нанесения полимерного антифрикционного покрытия на сопрягаемую втулку шлицевую.

Технология формообразования шлицев методом холодного пластического деформирования позволяет получить шлицы с высоким показателем микротвёрдости и шероховатости, что исключает последующие операции термической и механической обработок.

Нанесение полимерного покрытия на основе полиамида-11 на рабочие поверхности шлицев и наружную поверхность шлицевой втулки позволяет снизить коэффициент трения в паре и осевые усилия, возникающие при изменении длины карданного вала. Полиамид-11 является одним из наиболее прочных термопластов и имеет хорошие антифрикционные

свойства и износостойкость. Он стоек к воздействию влаги, масел и высоких температур, вызывающих искажение формы. Покрытие устраняет шум, возникающий при работе, и служит до некоторой степени демпфером возникающих колебаний. Применение полимерного покрытия шлицевого соединения исключает его периодическую смазку, проводимую примерно два раза в год, что снижает трудоемкость технического обслуживания. Кроме того, осевые усилия, воздействующие на подшипники соединяемых агрегатов, на 40 % меньше. Снижение на 40 % осевых усилий дает увеличение в 2–3 раза долговечности подшипников коробок передач и ведущих мостов [10].

Долговечность шлицевых соединений с покрытием Полиамид-11, с жидкостным азотированием, с антизадирным покрытием (фосфатированием) и без покрытия соответственно оценивается в следующем соотношении: 100 % – 50 % – 20 % – 10 %.

Результатом проведенных работ являются коррозионностойкие, износостойкие и не требующие технического обслуживания шлицевые соединения с высокой антизадирной способностью.

Также следует отметить, что применение антифрикционного полимерного покрытия значительно повышает долговечность уплотнений шлицевого соединения за счет одновременного нанесения покрытия на наружную поверхность шлицевой втулки.

Уплотнение конструктивно отличается от традиционно применяемых уплотнений шлицевых соединений. Уплотнение имеет 2–3 рабочие кромки и выполнено из полиуретановой композиции. Для полиуретановых композиций характерно высокое сопротивление разрыву и истиранию. По своим свойствам они превосходят другие эластомеры такой же твердости, например, резины. Полиуретановые композиции отличаются сравнительно хорошей стойкостью к маслам и прекрасной стойкостью к воздействию ультрафиолетовых лучей. Рабочие температуры полиуретановых уплотнений лежат в диапазоне от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$, эластические свойства при этом практически не изменяются. Причем полиуретановые уплотнения имеют низкий коэффициент трения.

Все вышеперечисленные особенности шлицев, полученных методом холодного пластического деформирования, полиуретановых уплотнений в сочетании с покрытой полимером шлицевой втулкой гарантируют ресурс шлицевого соединения на весь срок службы транспортного средства.

Стендовые испытания карданных валов ЖД1-4250010-06 шестой серии были проведены в испытательном центре АО «НВЦ «Вагоны». Схема стендовой испытательной установки приведена на рисунке 5.

Ходовые динамико-прочностные испытания проводились на скоростном полигоне ФГУП ВНИИЖТ Белореченская – Майкоп Северо-Кавказской железной дороги с достижением максимальной скорости 160 км/ч.

Подконтрольная эксплуатация опытно-промышленной партии карданных валов ЖД1-4250010-06 проводилась в пассажирских депо различных регионов Российской Федерации.

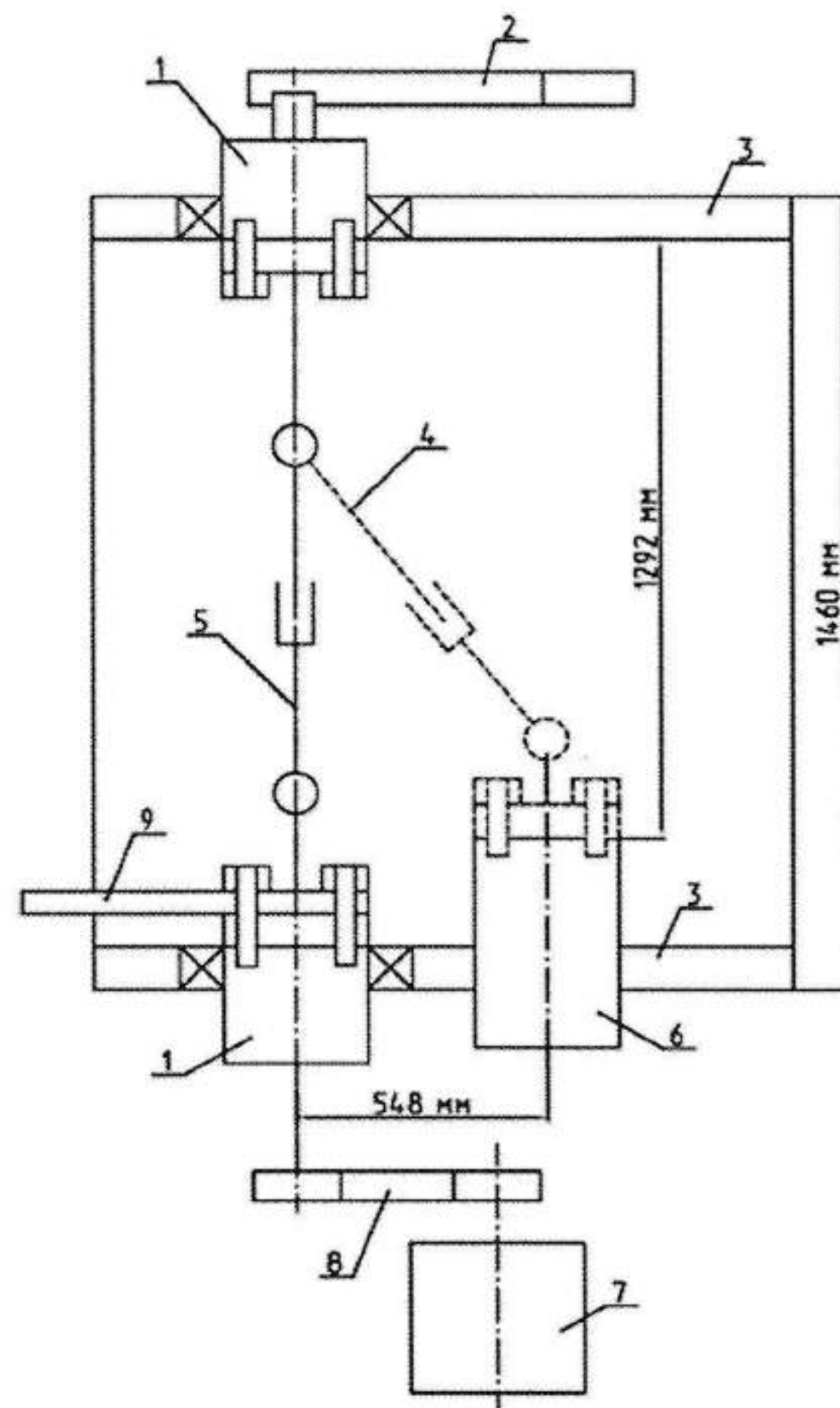


Рисунок 5 – Схема испытательной установки:
1 – подшипниковая опора; 2 – съемный рычаг; 3 – основание;
4 – кардан с отклонением 20° от центрального положения;
5 – кардан в центральном положении; 6 – неподвижная опора;
7 – электродвигатель; 8 – ременная передача; 9 – съемный фиксатор

Заключение. Таким образом, с учетом опыта эксплуатации и системного подхода к анализу основных элементов карданного вала создана конструкция нового поколения для привода генератора кондиционирования воздуха пассажирских вагонов.

Проведенные стендовые, динамико-прочностные испытания и подконтрольная эксплуатация опытно-промышленной партии карданных валов ЖД1-4250010-06 шестой серии показали значительное повышение прочностных характеристик и долговечности с пробегом вагонов до 1000000 миллиона километров и были рекомендованы для комплектации пассажирских вагонов.

Список литературы

- 1 Кравченко, В. И. Карданные передачи: конструкции, материалы, применение / В. И. Кравченко, Г. А. Костюкович, В. А. Струк. – Минск : Тэхналогія, 2006. – 409 с.
- 2 Заславский, О. Я. Системный подход как метод исследования долговечности карданной передачи / О. Я. Заславский // Автомобильная промышленность. – 1981. – № 11. – С. 21–24.
- 3 Малаховский, Я. Э. Карданные передачи / Я. Э. Малаховский, А. А. Лапин, Н. К. Веденеев; под ред. А. А. Липгарта. – М. : Машгиз, 1962. – 156 с.
- 4 Проектирование универсальных шарниров и ведущих валов / А. Х. Беркер, И. Р. Вагнер, И. В. Вебстер [и др.]. – Л. : Машиностроение, 1984. – 463 с.

5 Методы создания конструкций карданных передач повышенного ресурса для наземных транспортных средств и сельскохозяйственной техники / Г. А. Костюкович, А. В. Попрукайло, Е. В. Овчинников [и др.] // Наука и техника. – 2003. – Т. 22, № 2. – С. 119–126.

6 Карданные передачи ОАО «Белкард» и перспектива развития их конструкций / Г. А. Костюкович, М. Е. Кипнис, С. А. Носов, В. А. Савельев // Труды НАМИ. – 2019. – № 3. – С. 43–52.

7 Карданные передачи грузовых автомобилей. Проблемы и решения / С. Н. Иванов, А. И. Козадаев, Б. Е. Поваров, И. В. Сокруто // Автомобильная промышленность. – 1992. – № 11. – С. 12–15.

8 Яскевич, З. Ведущие мосты / З. Яскевич; пер. с польск. Г. В. Коршунова. – М. : Машиностроение, 1985. – 600 с.

9 Костюкович, Г. А. Технология изготовления крестовин карданных валов из стали пониженной прокаливаемости 60ПП / Г. А. Костюкович // Вестник Гродненского государственного университета им. Янки Купалы. Серия 2. Техника. – 2003. – № 1. – С. 68-75.

10 Особенности технологии полимерных покрытий шлицевых соединений карданных передач / Г. А. Костюкович, А. В. Попрукайло, А. С. Воронцов, Д. С. Калынов, // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 2(79). – С. 44–53.

Получено 10.09.2025

A. V. Paprukaila, G. A. Kastsjukovich, E. V. Auchynnika, D. S. Kalynov. Design features of the cardan shaft of the air conditioning generator drive of passenger cars.

Cardan shafts that compensate for axial displacement and transmit torque at constant or variable angles between connected components are examined. It is shown that cardan shafts must have torsional strength sufficient to ensure torque transmission without the risk of premature failure. The article examines the current problem of improving cardan shafts, increasing their reliability and ergonomics based on new design solutions optimized for dynamic parameters, materials used, manufacturing technologies, assembly and operation. A systematic approach to the creation of a new generation cardan shaft for driving an air conditioning generator in passenger cars is presented based on research in the field of operating conditions, materials technology, and optimal design. It has been demonstrated that, based on the research results, a design for a cardan shaft for a passenger car air conditioning generator drive with improved technical characteristics has been created, which, in terms of its parameters, is not inferior to the best foreign analogues.

УДК 629.4.027

К. А. ЕМЕЛЬЯНОВА, магистр, Р. И. ЧЕРНИН, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕДИКТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА И ЕГО ЭЛЕМЕНТОВ

Приведены тенденции использования предиктивной диагностики сложных технических объектов и систем в различных отраслях промышленности и преимущества её использования, отмечены основные проблемы при использовании, а также сделан вывод о целесообразности разработки методов предиктивной диагностики для железнодорожного подвижного состава и его элементов с целью снижения затрат и повышения безопасности движения поездов.

Предиктивный анализ как таковой нашёл широкое применение в различных областях человеческой деятельности: в бизнес-технологиях, строительстве и технике.

Для уменьшения влияния реактивного типа принятия решений (немедленная реакция на уже возникшую проблему, а не действия, направленные на её предотвращение) в сфере технического обслуживания и ремонта подвижного состава важно переходить к проактивному типу, так как это позволяет предотвратить неисправность или отодвинуть её на неопределённое время. Реализация этого перехода возможна путём использования предиктивной диагностики подвижного состава и его элементов, основанной на анализе данных из прошлого и настоящего для выявления закономерностей, позволяющих прогнозировать следующие события или состояние объекта контроля (рисунок 1).

Для обоснования актуальности внедрения предиктивной диагностики в сфере эксплуатации подвижного состава проведён анализ исследования работ различных авторов.



Рисунок 1 – Место предиктивной диагностики в жизненном цикле оборудования (P-F кривая) [3, с. 56, рисунок 1]

В рамках данного анализа рассмотрены ключевые аспекты воздействия предиктивных методов на эффективность эксплуатации оборудования и подвижного состава, а также потенциальные экономические и безопасностные преимущества. Ниже представлена таблица 1 с систематизированной информацией, отражающей основные выводы и задачи, связанные с внедрением предиктивной диагностики в соответствующих сферах.

Таблица 1 – Результаты анализа использования предиктивной диагностики в различных отраслях

Тема исследования	Описание	Вывод
Использование предиктивной диагностики в судоремонтном производстве	Предиктивная диагностика применяется для технологического оборудования с целью снижения риска аварий и простоев, оптимизации обслуживания и ремонта, повышения надёжности и долговечности оборудования, снижения операционных расходов и улучшения планирования производства [1]	Внедрение предиктивной диагностики в судоремонтном производстве способствует повышению эффективности, безопасности и экономичности эксплуатации оборудования
Применение предиктивной аналитики в строительстве	В строительной отрасли прогностическая аналитика используется для составления более точных бюджетов, учитывающих возможные риски и факторы, а также для прогнозирования потребностей в материальных ресурсах и финансовых потоках на основе исторических данных [2]	Прогностическая аналитика помогает улучшить планирование, снизить неопределённость и повысить эффективность управленческих решений
Предиктивная диагностика высоковольтных электродвигателей	В публикации [3] представлена функциональная схема жизненного цикла оборудования (см. рисунок 1), в которой выделено место предиктивной диагностики. Проведен анализ статистических данных по дефектам высоковольтных электродвигателей, сформирован набор параметров для диагностической модели, применены методы машинного обучения для раннего обнаружения отклонений. Полученные результаты являются подготовительной стадией для дальнейшего развития системы предиктивной диагностики	Создана база и методы для внедрения системы предиктивной диагностики электродвигателей, которая позволит своевременно выявлять дефекты и повысит надёжность оборудования
Научные основы применения методов интеллектуального анализа данных для контроля состояния локомотивов	В [4] созданы нейросетевые эталонные диагностические модели, подтвержденные устойчивой сходимостью результатов моделирования и реальных данных подсистем диагностики тепловозов модели 2ТЭ116У. Кроме того, предложены методы интеллектуальной обработки информации – обнаружение буксования колесных пар и автоматическая настройка характеристик системы автоматического регулирования тягового генератора	Разработанные модели и методы позволяют повысить надёжность и автоматизированность диагностики тепловозного оборудования, что способствует повышению его эффективности и безопасности

Продолжение таблицы 1

Тема исследования	Описание	Вывод
<p>Разработка и тестирование диагностических и прогнозных моделей для тепловозов. Экономическая эффективность системы предиктивного контроля</p>	<p>В [5] разработаны, обучены и протестированы диагностические модели системы смазки, характеризующие текущее состояние, на реальных данных (2014 – 2019 гг.). Построены и протестированы прогнозные модели на базе однослойных нейронных сетей с точностью не менее 96 % на 30 суток. Оценка показывает, что внедрение системы на парк из 273 секций моделей 2ТЭ116У и ТЭП70БС позволит сэкономить более 35 млн рублей в год, при окупаемости примерно 2 года</p>	<p>Созданы эффективные системы диагностики и прогнозирования для тепловозов, что позволяет обеспечивать их надежную эксплуатацию и плановое техническое обслуживание. Внедрение системы предиктивного контроля выгодно и позволяет быстро окупить затраты, повышая эффективность эксплуатации тепловозов</p>
<p>Повышение эффективности эксплуатации газодинамического оборудования с помощью предиктивной аналитики для снижения числа отказов [6]</p>	<p>Теоретические основы и практический опыт применения системы предиктивной аналитики. Повышение эффективности эксплуатации</p>	<p>Высокая эффективность аналитики снижает отказы, уменьшает затраты на ремонт. Совмещение классических моделей и машинного обучения позволяет точнее выявлять проблемы и вовремя реагировать</p>
<p>Последние достижения и тенденции в системах предиктивного производства в условиях большого объема данных [7]</p>	<p>Ключевые компоненты системы предиктивной аналитики включают следующие этапы: сбор и хранение данных для формирования баз данных; предобработку данных (очистка, удаление шумов, выбросов, нормализация и синхронизация временных рядов); анализ и извлечение ключевых признаков; построение прогностических моделей с помощью алгоритмов регрессии, нейронных сетей, деревьев решений и др.; оценку и валидацию моделей; интеграцию системы в существующую инфраструктуру мониторинга</p>	<p>Эти компоненты образуют полную цепочку для реализации эффективной системы предиктивной аналитики, которая может обеспечить точное предсказание и автоматизацию управленческих решений. Успех системы зависит от правильного выполнения каждого этапа</p>
<p>Ограничения использования системы предиктивной аналитики</p>	<p>Требуется высокий уровень качества исходных данных, поскольку эффективность моделей существенно зависит от точности, полноты и своевременности данных. Интеграция системы в существующую инфраструктуру сложна и требует значительных усилий, особенно при несовместимости технологий. Высокая вычислительная нагрузка возникает из-за необходимости обработки больших объемов данных в режиме реального времени, что требует современных мощных вычислительных ресурсов. Некоторые модели, особенно глубокого обучения, являются «черными ящиками», что затрудняет их интерпретацию и усложняет принятие управленческих решений на их основе</p>	<p>Эти ограничения подчеркивают необходимость инвестировать в качество и подготовку данных, развивать инфраструктуру и учитывать особенности моделей, чтобы успешно внедрять системы предиктивной аналитики. Они также свидетельствуют о существующих вызовах, связанных с вычислительной мощностью и интерпретируемостью результатов</p>
<p>Методы предиктивного анализа для сложных технических систем [8]</p>	<p>Основные подходящие методы включают: 1. Регрессионные методы: линейная, логистическая, множественная логистическая регрессия, пробит-регрессия, анализ временных рядов, классификационные и регрессионные деревья, многомерные адаптивные регрессионные сплайны. 2. Методы машинного обучения: искусственные нейронные сети, многослойный перцептрон, радиальные базисные функции, метод опорных векторов, наивный байесовский классификатор, метод ближайших соседей, геопространственное предсказательное моделирование, генетический алгоритм</p>	<p>Предложенные методы обеспечивают широкий инструментарий для анализа и прогноза в сфере технических систем, позволяя учитывать различную природу данных и сложности моделей. Выбор конкретного метода зависит от задачи, структуры данных и цели анализа</p>
<p>Задача предиктивного анализа в техническом обслуживании оборудования</p>	<p>Применение предиктивных алгоритмов и методов машинного обучения позволяет осуществлять непрерывный анализ больших объемов данных о текущем состоянии оборудования, выявлять ранние признаки возможных отказов и прогнозировать их возникновение, что способствует своевременному техническому обслуживанию и ремонту</p>	<p>Использование прогнозной аналитики улучшает надежность и эффективность эксплуатации оборудования, способствует снижению затрат за счет предупреждения аварий и оптимизации планов технического обслуживания</p>
<p>Основные проблемы использования предиктивной диагностики и аналитики</p>	<p>1 Проблема унификации прогностической модели – данные, полученные для одного элемента оборудования, не могут применяться к аналогичным устройствам. 2 Проблема экспертной оценки – трудность найти специалиста с достаточным опытом в узкой области. 3 Проблема сбора и интерпретации данных – качество обучения нейросетей зависит от глубины архива и периодичности данных. 4 Проблема ранжирования по критичности – необходимо учитывать важность различных прогнозов, чтобы приоритеты были ясны. Также выделяется проблема «ошибки выжившего», когда модель учится только на неисправностях, уже имевших место, что ограничивает возможность выявлять все виды неисправностей, поэтому предлагается обучение на нормальных состояниях</p>	<p>Несмотря на существующие сложности, предиктивная диагностика достигла высокого уровня эффективности и продолжает развиваться за счет расширения базы знаний, повышения качества данных и улучшения сенсорных технологий</p>

Тема исследования	Описание	Вывод
Перспективы разработки методов для подвижного состава и его элементов	Безопасность и надежность подвижного состава могут быть обеспечены за счет прогнозирования потенциальных проблем на ранних стадиях, что поможет предотвратить аварии и снизить расходы. Также важно оптимизировать техническое обслуживание и своевременно устранять дефекты для продления срока службы элементов, что уменьшит затраты на ремонт	Разработка таких методов способна значительно повысить безопасность, эффективность и экономичность эксплуатации подвижного состава
Перспективы разработки методов для подвижного состава и его элементов	Безопасность и надежность подвижного состава могут быть обеспечены за счет прогнозирования потенциальных проблем на ранних стадиях, что поможет предотвратить аварии и снизить расходы. Также важно оптимизировать техническое обслуживание и своевременно устранять дефекты для продления срока службы элементов, что уменьшит затраты на замену и ремонт	Разработка таких методов способна значительно повысить безопасность, эффективность и экономичность эксплуатации подвижного состава
Анализ отцепок грузовых вагонов в РФ и необходимость предиктивной диагностики	В I квартале 2024 года суммарно отцеплено 334 тысячи грузовых вагонов в текущий ремонт (ТР-1 и ТР-2). Анализ показал, что основные неисправности распределены по узлам так: колесная пара (65,6 %), тележка (16,9 %), автосцепное устройство (12,5 %), автотормозное оборудование (3,3 %), кузов (1,4 %) и прочие (0,3 %). Более 80 % от общего числа отцепок приходится на ходовые части грузовых вагонов, что делает разработку методики предиктивной диагностики этих компонентов важной научно-технической задачей. Ее решение позволит снизить эксплуатационные расходы и повысить безопасность движения [10]	Основная часть неисправностей грузовых вагонов связана с ходовыми частями, что обосновывает необходимость внедрения предиктивных методов для их диагностики с целью повышения надежности и эффективности эксплуатации
Актуальность внедрения предиктивной диагностики подвижного состава	В работе [11] подчеркивается, что переход от обслуживания на основе среднестатистических данных (например, наработка на отказ и вероятность безотказной работы в гарантийный период) к обслуживанию по фактическому техническому состоянию является эффективным способом снижения затрат на техническое обслуживание и ремонт	Внедрение предиктивной диагностики позволяет оптимизировать сроки и объемы технического обслуживания, что ведет к существенной экономии расходов и повышению надежности подвижного состава

Список литературы

1 **Неснова, М. В.** Внедрение предиктивной диагностики технологического оборудования на судостроительном производстве / М. В. Неснова // Журнал прикладных исследований. Сетевой научно-практический журнал. – 2023. – № 12. – С. 53–58. – DOI: 10.47576/2949-1878-2023-12-53/.

2 **Камаева, Ю. В.** Перспективы использования предиктивной аналитики в строительстве / Ю. В. Камаева, Л. А. Адамцевич // Строительство и архитектура. – 2023. – Т. 11, № 2 (39). – С. 91–99. – DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-2-12-12.

3 **Кирьянов, Н. А.** Предиктивная диагностика высоковольтных электродвигателей / Н. А. Кирьянов, А. Н. Комков // Интеллектуальная электротехника. – 2024. – № 2. – С. 53–68. – EDN: UNPLGC.

4 **Грачёв, В. В.** Научные основы применения методов интеллектуального анализа данных для контроля технического состояния локомотивов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.07 / В. В. Грачёв ; ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I». – СПб., 2019. – 34 с.

5 **Федотов, М. В.** Предиктивная диагностика оборудования тепловоза на основе интеллектуального анализа данных : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / М. В. Федотов ; ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I». – СПб., 2021. – 18 с.

6 **Москвитин, В. В.** Повышение эффективности эксплуатации газодинамического оборудования посредством ис-

пользования системы предиктивной аналитики для снижения числа отказов оборудования / В. В. Москвитин // Вестник АГТИ. – 2025. – № 1. Ч. 1. – С. 51–73.

7 Последние достижения и тенденции в системах предиктивного производства в условиях большого объема данных / J. Lee, E. Lapira, V. Bagheri, H. A. Kao // Manufacturing Letters. – 2013. – № 1 (1). – P. 38–41. – DOI: 10.1016/j.mfglet.2013.03.002.

8 **Ильичев, В. Ю.** Использование методов предиктивной аналитики для обработки сигналов с датчиков частоты вращения роторных машин / В. Ю. Ильичев, Е. А. Юрик // Научное обозрение. Технические науки. – 2019. – № 1. – С. 22–26. – URL: <https://science-engineering.ru/ru/article/view?id=1226> (дата обращения: 25.09.2025).

9 **Брюхова, А. А.** Проблемы предиктивной диагностики и аналитики / А. А. Брюхова, Т. Н. Костюнина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 7. – С. 335–338.

10 **Агафонов, М. С.** Отцепки грузовых вагонов в неплановый ремонт в первом полугодии 2024 г. / М. С. Агафонов // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2024. – № 2 (79). – С. 11–13.

11 **Адауров, А. С.** Интеллектуальные системы поддержки принятия решений и предиктивной диагностики стационарными средствами диагностики подвижного состава на ходу поезда / А. С. Адауров, А. С. Семенова // Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт : сб. материалов II Междунар. конф., Москва, 24–25 авг. 2023 г. – М. : Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, 2023. – С. 13–17. – EDN ZHARYR // НЭБ eLIBRARY.

Получено 10.11.2025

K. A. Yemialyanava, R. I. Chernin. Application of predictive diagnostics of railway rolling and its elements.

The article presents trends in the use of predictive diagnostics of complex technical facilities and systems in various industries and the advantages of its use, highlights the main problems with its use, and concludes that it is advisable to develop predictive diagnostic methods for railway rolling stock and its elements in order to reduce costs and improve train safety.

УДК 629.4.027.3:629.4.018

Н. В. КОМАРОВСКИЙ, аспирант, А. Г. ОТОКА, аспирант, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель; М. Г. ГЕГЕДЕШ, кандидат технических наук, Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого

ОСОБЕННОСТИ КОМПЛЕКСНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРУЖИН РЕССОРНОГО ПОДВЕШИВАНИЯ ТЕЛЕЖКИ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Рассмотрены особенности проведения комплексных испытаний цилиндрических пружин рессорного подвешивания грузовых вагонов железнодорожного подвижного состава. Приведены методы контроля химического состава, микроструктуры, геометрических параметров, твердости и усталостной долговечности пружин. Показано оборудование магнитопорошкового контроля, применяемое для выявления продольных и поперечных трещин. Описаны испытательные стенды, оборудование и нормативные документы, регламентирующие испытания пружин.

Введение. Пружины рессорного подвешивания являются ключевым элементом упругой системы грузовых вагонов, обеспечивающим восприятие и демпфирование динамических нагрузок, возникающих при движении железнодорожного подвижного состава. Указанные конструктивные элементы работают в тяжелых условиях эксплуатации и подвержены многоцикловым знакопеременным нагрузкам как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскости, что приводит с течением времени к изменению микроструктуры, деградации упругих свойств и появлению усталостных трещин.

От стабильности характеристик пружин рессорного подвешивания зависят безопасность движения и долговечность эксплуатации вагонов, поэтому проведение комплексных испытаний в соответствии с государственным стандартом [1] включает анализ структуры, химического состава, геометрических параметров, твердости и усталостных свойств, характеризующих долговечность изделий.

В научной литературе имеется много работ, посвященных изучению усталостной долговечности пружин. Так, например, в работе [2] авторы проводят комплексные экспериментальные исследования усталостной прочности пружин боковых скользунов грузовой тележки с оценкой эффективности применения термической и дробеструйной обработки в процессе их изготовления. Авторы статьи [3] привели результаты исследований прочности и долговечности пружин рессорного подвешивания с помощью разработки конечно-элементной модели пружины с последующим проведением расчетов по определению напряженно-деформированного состояния под действием статических и динамических нагрузок, а также тензометрирования опытных образцов пружин. При этом проводились испытания на циклическую долговечность, осуществлялся выбор режима нагружения.

В исследовании [4] описаны пути повышения долговечности винтовых цилиндрических пружин сжатия с круглым сечением витка при динамическом нагружении. Авторами работ [5, 6] разработаны конечно-элементные модели пружин с учетом необходимых граничных условий. Многие работы посвящены проблемам, связанным с расчетами и оценкой горизонтальной жесткости пружин, которые не учитываются

при натуральных испытаниях. Стендовые испытания, как правило, проводятся только под действием вертикальной сжимающей нагрузки [6, 7].

Исследование [8] показало, что максимальные значения нормальных напряжений в горизонтальной плоскости более чем в два раза превышают максимальные значения нормальных напряжений в вертикальной плоскости, а касательные напряжения в пружинах рессорного подвешивания, возникающие от действия крутящих моментов, характеризуются неравномерным распределением по длине, колебания значений достигают $\pm 15\text{--}20\%$, а в двух локальных зонах, прилегающих к опорным виткам, их значение на $5\text{--}10\%$ выше значений напряжений, рассчитанных по стандартной методике.

Одним из основных показателей, регламентирующих качество изготовления пружин при сертификационных испытаниях в соответствии с государственными стандартами, является химический состав используемой для их изготовления стали, контроль которого осуществляется спектральным или рентгено-флуоресцентным методом [9].

На рисунке 1 представлен стенд для определения химического состава исследуемой части пружины с помощью спектрометра ДФС-500, который с высокой точностью определяет содержание основных и легирующих элементов. Известно, что наиболее распространенными марками сталей для пружин являются 60С2ХА и 60С2ХФА, характеризующиеся высокой упругостью и сопротивлением усталости [10].



Рисунок 1 – Определение химического состава при помощи спектрометра ДФС-500

Оценка микроструктуры выполняется на поперечных микрошлифах, размеры которых выбираются так, чтобы охватывать всё поперечное сечение витка пружины либо его часть, включающую поверхностный слой и основной металл. При разделении образцов для изготовления микрошлифов температура не должна превышать 150 °С для исключения термических изменений структуры. Изготовление микрошлифов осуществляется в соответствии с технологической документацией предприятий.

Исследование микроструктуры основного металла проводят с использованием металлографического микроскопа при увеличении 500^x. Анализ поверхностной зоны выполняется при увеличении 100^x на микрошлифах, предварительно протравленных 4%-м раствором азотной кислоты в этиловом спирте (4 см³ HNO₃ на 100 см³ спирта), либо раствором пикриновой кислоты (4 г пикриновой кислоты на 100 см³ спирта), либо смесью этих реагентов в соотношении 1:4. Оценку микроструктуры готовых пружин проводят путем сопоставления микроструктуры с эталонами шкал 1 и 2 (приложения А и Б) по государственному стандарту [11].

На рисунке 2 показан пример полученных результатов микроструктуры пружин рессорного подвешивания при увеличении 100^x и 500^x с использованием тринокулярного микроскопа BS-6030. Анализ микроструктуры позволяет выявить равномерность отпуска, наличие остаточных аустенитных включений и обез-

углероженных слоев, влияющих на усталостную прочность.

Контроль геометрических параметров проводится после проверки остаточной деформации пружины. Испытания выполнялись на испытательной машине TIME WDW-300 E, обеспечивающей возможность приложения пробной нагрузки с высокой точностью и регистрации перемещения подвижной траверсы (рисунок 3, а).

Согласно требованиям государственного стандарта [1], контроль остаточной деформации выполняется методом сжатия пружины пробной нагрузкой. Перед измерением пружина предварительно трижды сжимается, после чего фиксируется её высота в свободном состоянии в определённой точке вертикального сечения, проходящего через середину дуги опорной поверхности. Затем пружину вновь нагружают пробной нагрузкой, полностью разгружают и повторно измеряют высоту в той же точке. Остаточная деформация определяется как разность между первоначальной и повторно измеренной высотой пружины в свободном состоянии.

Измерение высоты пружины в свободном состоянии проводилось на плите поверочной и разметочной, тип № 1-2-1000×630, при помощи штангенрейсмаса ценой деления 0,05 мм, тип ШР-0-1000-0,05, обеспечивающего высокую точность фиксации размеров. На рисунке 3, б показано расположение пружины на плите и порядок выполнения измерений.

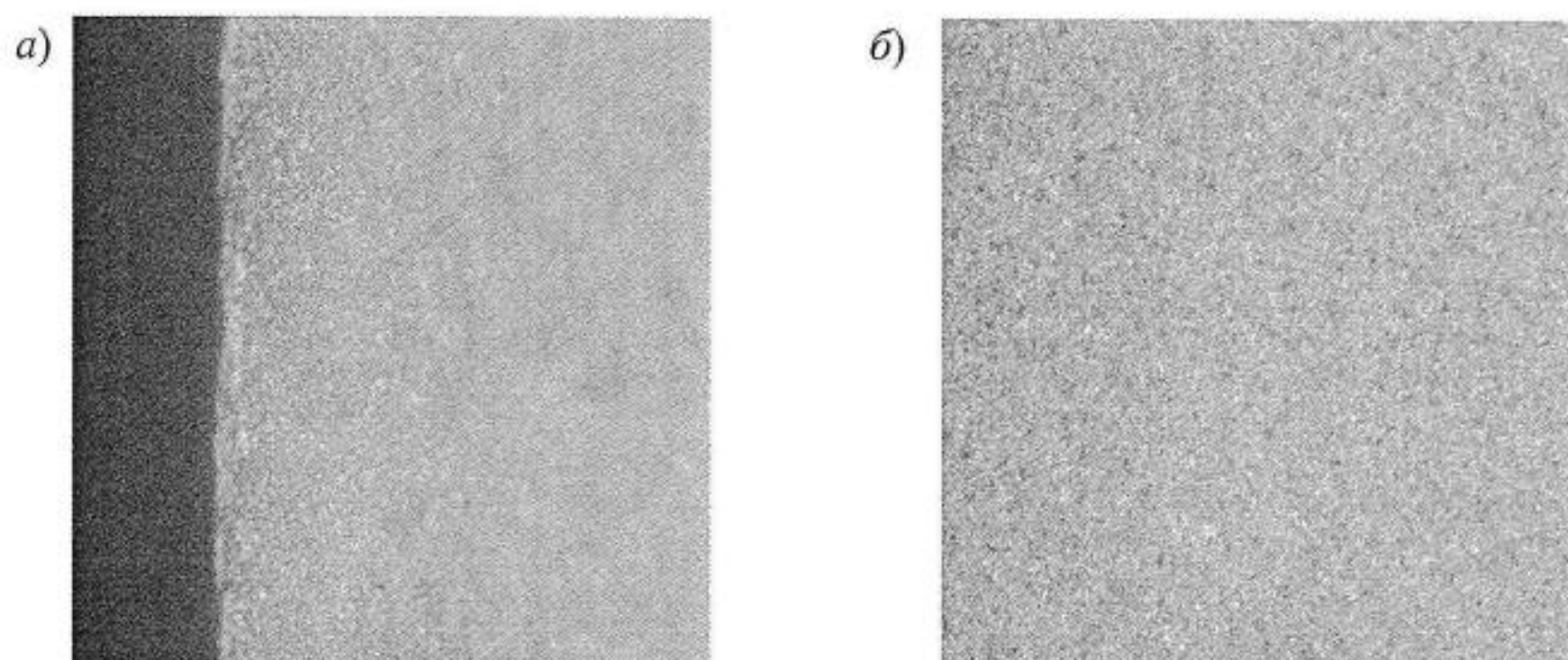


Рисунок 2 – Определение микроструктуры поверхностной зоны при увеличении 100^x (а) основного металла и при увеличении 500^x (б) с использованием тринокулярного микроскопа BS-6030

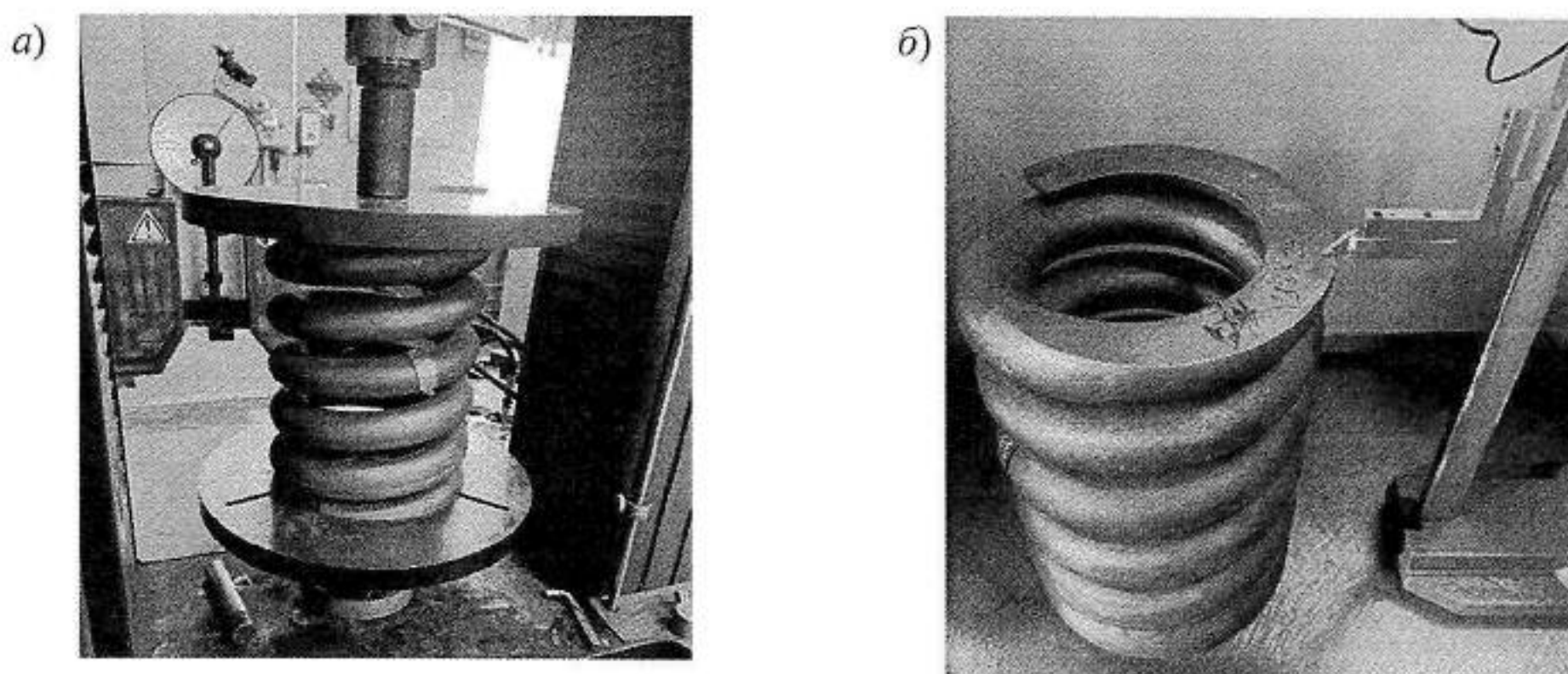


Рисунок 3 – Испытание пружины на испытательной машине TIME WDW-300 E при проверке остаточной деформации (а) и измерение высоты пружины на плите поверочной и разметочной, тип № 1-2-1000×630, при помощи штангенрейсмаса ценой деления 0,05 мм, тип ШР-0-1000-0,05 (б)

Контроль высоты пружины l_1 , мм, под расчетной статической нагрузкой проводят методом сжатия ее расчетной нагрузкой F_1 , кН, (значения l_1 и F_1 принимают в соответствии с техническими требованиями чертежа пружины). Измерение выполняют на испытательной машине TIME WDW-300 E, обеспечивающей плавное приложение нагрузки и фиксацию перемещений подвижной траверсы. За измеренную высоту пружины под расчетной статической нагрузкой $l_{изм}$, мм, принимают расстояние между опорными плоскостями устройства, сжимающего пружину.

Отклонение высоты пружины Δl_1 , мм, под расчетной статической нагрузкой

$$\Delta l_1 = |l_1 - l_{изм}|. \quad (1)$$

Предельные отклонения высоты пружины Δl_1 , мм, под расчетной статической нагрузкой не должны превышать:

- для пружин категории А – $\pm 0,015l_1$;
- для пружин категории Б – $\pm 0,02l_1$.

На рисунке 4 представлена схема измерения высоты пружины под расчетной статической нагрузкой на испытательной машине TIME WDW-300 E. Контроль допуска перпендикулярности оси пружины в свободном состоянии относительно опорных поверхностей проводят в соответствии с требованиями государственного стандарта.

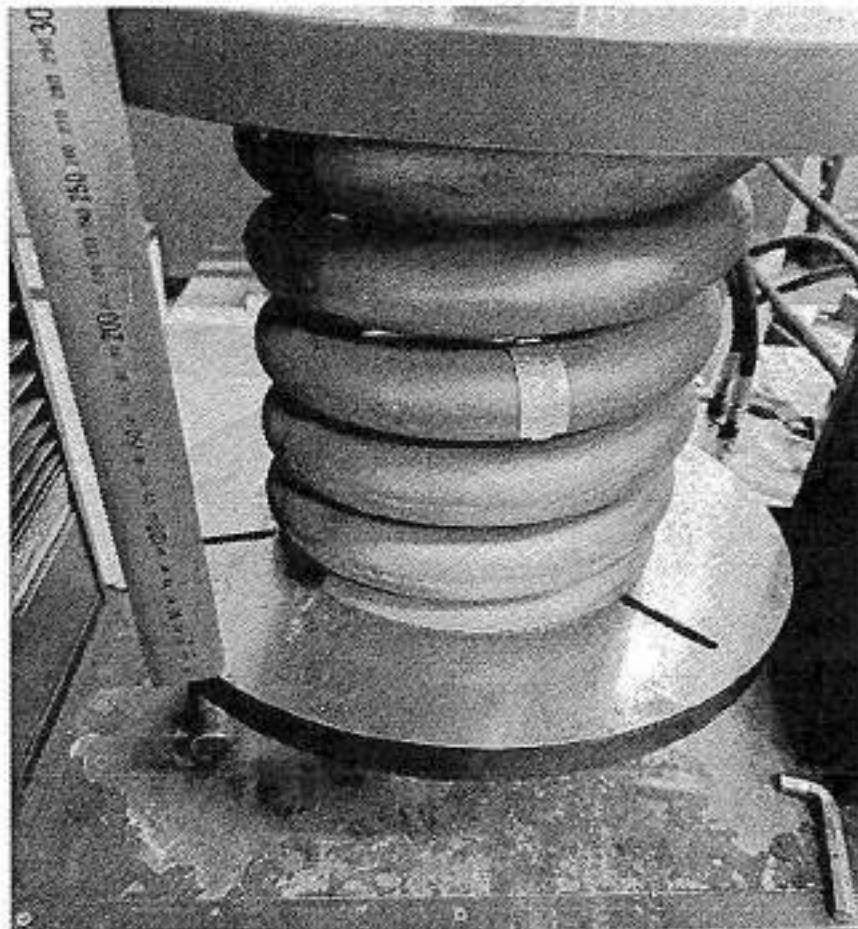


Рисунок 4 – Испытание пружины на испытательной машине TIME WDW-300 E при проверке высоты пружины под расчетной статической нагрузкой

Отклонение от перпендикулярности оси пружины относительно опорных поверхностей $e_{ср}$, мм, определяют для каждой из опорных поверхностей в плоскости наибольшего отклонения образующих пружины. Измерения выполняют с применением угольника поверочного УШ-2-400, обеспечивающего фиксацию смещения верхней и нижней опорных поверхностей относительно вертикальной оси пружины.

Процесс измерения выполняют согласно схеме на рисунке 5, где показано определение величин отклонения от перпендикулярности образующей пружины относительно нижней опорной поверхности на высоте верхнего рабочего витка e и отклонения от перпендикулярности противоположной образующей пружины относительно нижней опорной поверхности на высоте

нижнего рабочего витка e' для двух сторон пружины. Среднее значение отклонения от перпендикулярности

$$e_{ср} = (e + e')/2. \quad (2)$$

Допуск перпендикулярности оси пружины в свободном состоянии относительно опорных поверхностей должен быть $0,02l_0$, где l_0 – высота пружины в свободном состоянии.

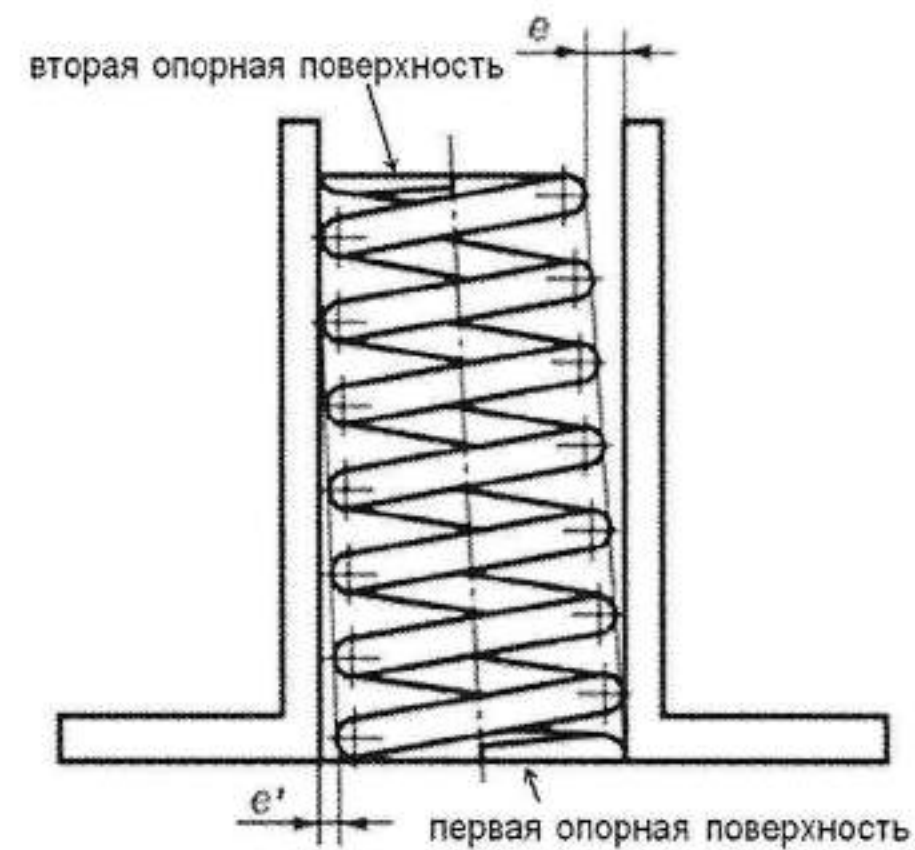


Рисунок 5 – Схема измерения отклонения от перпендикулярности оси пружины относительно опорной поверхности

На рисунке 6 показан реальный процесс проведения измерений допуска перпендикулярности оси пружины. Испытания выполнялись на плите поверочной и разметочной, тип № 1-2-1000×630, с применением угольника поверочного УШ-2-400 и набора щупов № 4; обеспечена вертикальная ориентация и визуальный контроль совпадения оси пружины с нормалью к опорной плоскости.

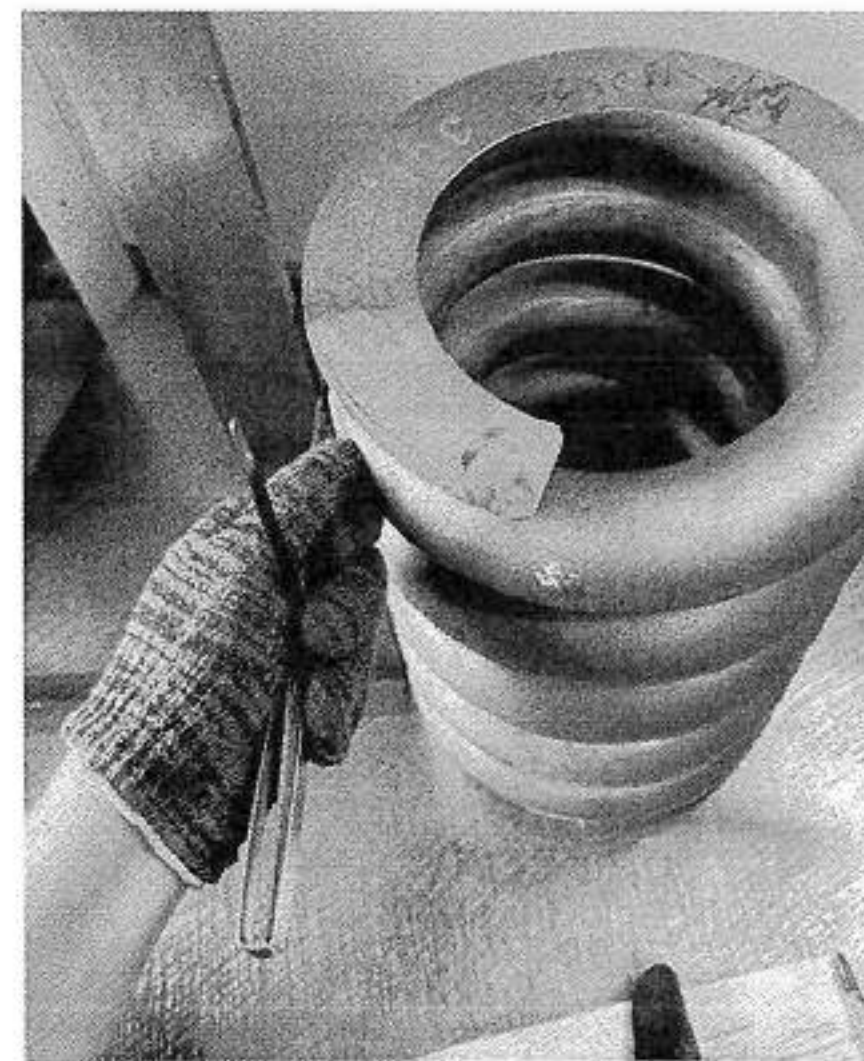


Рисунок 6 – Проведение измерений допуска перпендикулярности оси пружины на поверочной плите поверочной и разметочной, тип № 1-2-1000×630

Испытания на твердость проводились в соответствии с требованиями государственного стандарта [12]. Целью испытаний является определение соответствия свойств материала пружины заданным значениям и контроль равномерности твердости по сечению изделия.

Измерение твердости пружины проводят на защищенной до глубины гарантированного удаления обезуглероженного слоя боковой поверхности опорного витка и обеспечения плотного прилегания индентора. Измерения выполнялись на твердомере стационарном (HBRVU-187.5) Integral-5, обеспечивающем контроль параметров нагружения и автоматическую фиксацию показаний твердости. Нагрузка прикладывалась плавно, согласно методике государственного стандарта, с выдержкой под нагрузкой не менее 10 с.

На рисунке 7 показан реальный процесс проведения испытаний на твердость на твердомере стационарном (HBRVU-187.5) Integral-5, фиксирующем расположение образца, рабочую нагрузку и взаимодействие индентора с поверхностью металла.

Испытания на циклическую долговечность проводились с целью определения работоспособности пружин при длительном переменном нагружении, моделирующем реальные условия эксплуатации в рессорном подвешивании железнодорожных вагонов.



Рисунок 7 – Проведение испытаний на твердость пружины с использованием твердомера стационарного (HBRVU-187.5) Integral-5

Испытания выполнялись на стенде для испытаний листовых рессор и пружин СП-2 (рисунок 8), обеспечивающем приложение к пружине осевой переменной нагрузки по гармоническому закону с постоянными параметрами. Процесс нагружения осуществлялся в упругой области деформаций при одноступенчатом нагружении продольной силой, величина которой соответствовала расчетной статической нагрузке.

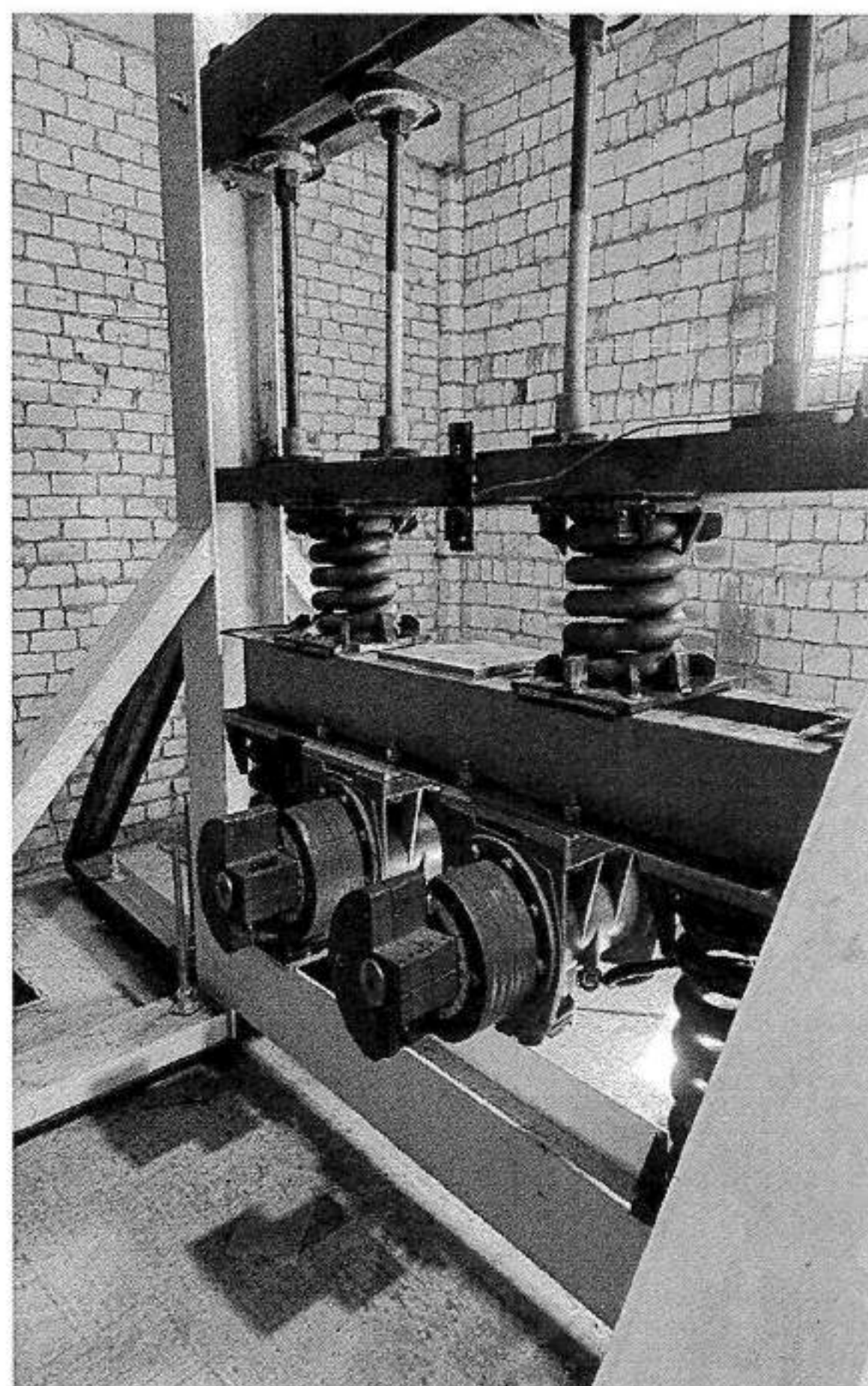


Рисунок 8 – Проведение испытаний на циклическую долговечность с использованием стенда для испытаний листовых рессор и пружин СП-2

Перед началом испытаний каждая пружина проходила контроль геометрических параметров и высоты в свободном состоянии. Циклическое нагружение осуществлялось при комнатной температуре с заданной частотой колебаний, обеспечивающей плавное изменение усилия от минимального до максимального значения в пределах упругих деформаций. Контроль параметров проводился автоматически с регистрацией числа циклов, амплитуды перемещения и усилий.

Испытания продолжались до достижения $0,5 \times 10^6$ циклов нагружения-разгрузки, после чего выполнялся повторный контроль упругих характеристик и визуальный осмотр поверхности витков. В ходе испытаний разрушений, появления трещин и остаточной деформации сверх нормы не зафиксировано, что свидетельствует о стабильности механических свойств и правильности выбранного режима термообработки.

Пружины также подвергаются неразрушающему контролю при наличии трещин. Одним из самых чувствительных методов, при котором трещины выявляются с минимальным раскрытием по ширине и глубине, является магнитопорошковый. Выявлять трещины в таком сложном по конфигурации объекте традиционными переносными дефектоскопами достаточно сложно. Поэтому производители средств неразрушающего контроля разрабатывают стационарные стенды под различные габаритные размеры пружин.

Для выявления разноориентированных трещин применяют комбинированное намагничивание путем циркулярного намагничивания пропускания тока через пружину за счет контактных пластин, а также медного стержня внутри пружины (он изолирован от контактных пластин) и продольного намагничивания с помощью соленоида (рисунок 9).

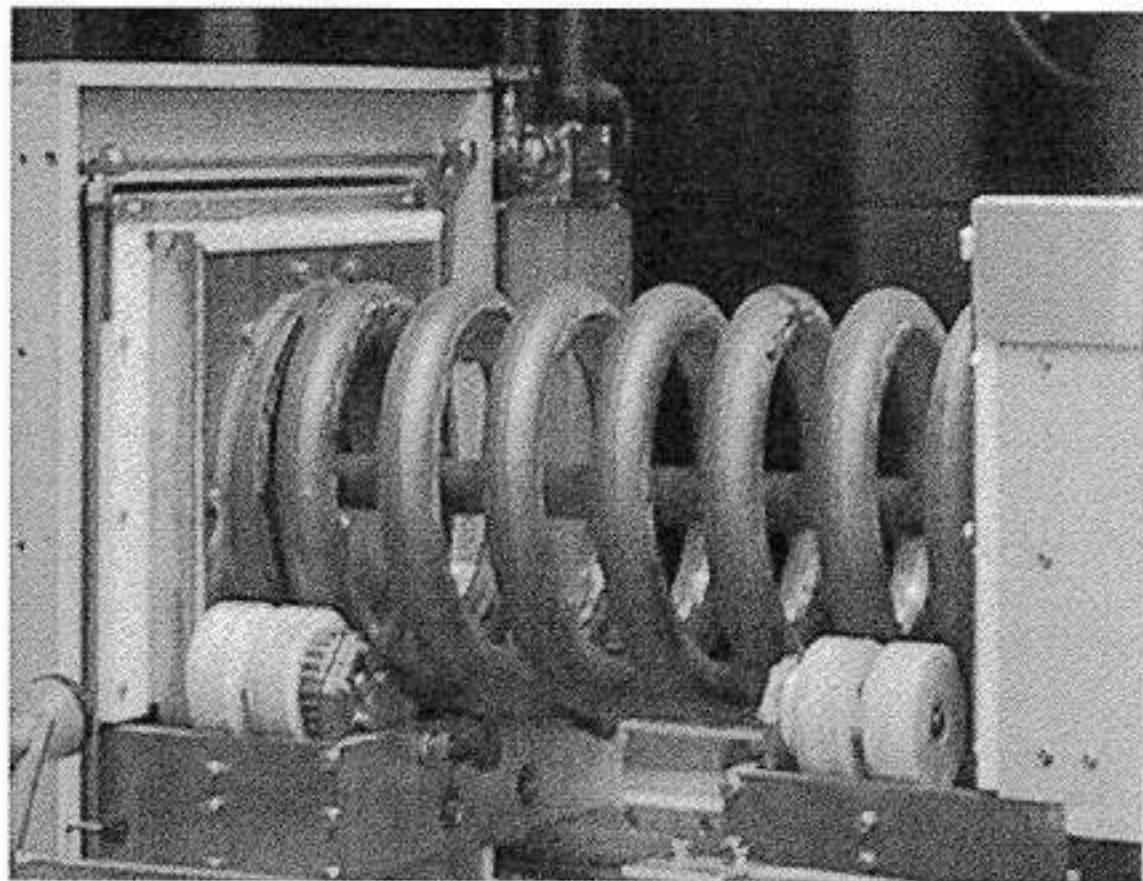


Рисунок 9 – Проведение магнитопорошкового контроля пружины с помощью дефектоскопа CRAFTTEST SPRING

Заключение. Следует отметить, что проведение комплексных испытаний пружин рессорного подвешивания имеет ключевое значение для обеспечения надёжности и безопасности железнодорожного подвижного состава. На основе результатов контроля химического состава, микроструктуры, геометрических параметров, твердости и усталостной долговечности, а также качества поверхности после визуального осмотра и проведения неразрушающего контроля формируется объективная оценка качества пружин и прогнозируется их эксплуатационное поведение в условиях реальных нагрузок. Сопоставление полученных данных с требованиями государственных стандартов позволяет своевременно выявлять отклонения, повышать уровень технологической дисциплины производства и гарантировать стабильность характеристик изделий, от которых напрямую зависит безопасность движения поездов и долговечность вагонных тележек. Результаты таких испытаний на сегодняшний день остаются наиболее востребованными и правдивыми. При этом полученные результаты на практике могут быть использованы и адаптированы для последующих расчетов конечно-элементных моделей в различных компьютерных средах.

Получено 24.11.2025

N. V. Komarovskiy, A. G. Otoka, M. G. Gegedesh. Features of comprehensive tests of cylindrical springs of spring suspension of railway rolling stock freight cars bogies.

The specifics of conducting comprehensive testing of coil springs used in spring suspension systems for freight cars is investigated. Methods for monitoring the springs' chemical composition, microstructure, hardness, geometric parameters, rigidity, and fatigue life are presented. There is demonstrated the magnetic particle inspection equipment used to detect longitudinal and transverse cracks. Test rigs, equipment, and regulatory documents governing spring testing are described.

Список литературы

- 1 ГОСТ 1452-2011 Пружины цилиндрические винтовые тележек и ударно-тяговых приборов подвижного состава железных дорог. Технические условия. – Введ. 01.01.2012. – М. : Стандартинформ, 2016. – 15 с.
- 2 Даниленко, Д. В. Исследование усталостной долговечности пружин боковых скользунов тележки модели 18-9891/ Д. В. Даниленко, В. П. Ефимов, В. А. Чернов // Известия ПГУПС. – 2023. – Т. 20, № 3. – С. 519–530.
- 3 Исследования усталостной прочности пружин рессорного подвешивания скоростных грузовых вагонов / С. В. Чунин, Э. С. Оганьян, Г. И. Гаджиметов [и др.] // Известия Транссиба. – 2023. – № 2 (54). – С. 42–49.
- 4 Девятериков, С. А. Пути повышения долговечности винтовых цилиндрических пружин сжатия с круглым сечением витка при динамическом нагружении / С. А. Девятериков // Актуальные вопросы науки и техники : сб. науч. трудов. – 2017. – Вып. IV. – С. 8–10.
- 5 Подходы к оценке напряженно-деформированного состояния пружин рессорного подвешивания грузовых вагонов / А. М. Орлова, С. А. Рудакова, Д. В. Шевченко [и др.] // Известия ПГУПС. – 2020. – Т. 17, вып. 2. – С. 221–232. – DOI: 10.20295/1815-588-2020-2-221-232.
- 6 Investigation for Failure Response of Suspension Spring of Railway Vehicle: A Categorical Literature Review / M. A. Kumbhalkar, D. V. Bhoje, P. P. Chaoj. A. V. Vanalkaret // J Fail. Anal. and Preven. – 2020. – Vol. 20. – P. 1130–1142. – DOI: 10.1007/s11668-020-00918-6.
- 7 Николаев, В. А. Оценка влияния параметров рессорного подвешивания грузового вагона на показатели его динамических качеств и безопасность движения / В. А. Николаев // Известия Транссиба. – 2017. – № 1 (29). – С. 17–27.
- 8 Ablyalimov, O. On the Question of Calculation Methodology of Springs of Spring Suspension of Rolling Stock for Strength / O. Ablyalimov, M. Z. Saghir // ICTEA: International Conference on Thermal Engineering. – 2025. – Vol. 1. – P. 2190–2198.
- 9 ГОСТ 22536.0-87 Сталь углеродистая и чугун нелегированный. Методы анализа. – Введ. 01.09.1988. – М. : Государственный комитет СССР по стандартизации, 1987. – 6 с.
- 10 ГОСТ 14959-2016 Металлопродукция из рессорно-пружинной нелегированной и легированной стали. Технические условия. – Введ. 01.01.2018. – М. : Стандартинформ, 2017. – 28 с.
- 11 ГОСТ 32205-2013. Пружины рессорного подвешивания железнодорожного подвижного состава. Шкала эталонов микроструктур. – Введ. 01.06.2014. – М. : Стандартинформ, 2014. – 14 с.
- 12 ГОСТ 9013-59 (ИСО 6508-86) Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу. – Введ. 01.01.1969. – М. : Издво стандартов, 2001. – 8 с.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА

УДК 656.2:004.9

А. А. ЕРОФЕЕВ, доктор технических наук, Д. В. ЛЯПОРОВ, аспирант, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ФОРМИРОВАНИЮ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ УЧАСТКОВ

Рассмотрены теоретические подходы к формированию цифрового двойника железнодорожного участка. Проведен анализ определений цифровых двойников и выделены задачи, которые решает цифровой двойник железнодорожного участка. Рассмотрены характеристики, типы и структура цифровых двойников. Описаны аспекты внедрения и применения цифровых двойников в железнодорожной отрасли. Представлена модель создания и внедрения цифрового двойника железнодорожного участка и обозначены направления будущих исследований, связанных с анализом технических и технологических параметров объектов путевой инфраструктуры железнодорожных участков, влияющих на организацию перевозочного процесса.

В настоящее время в условиях стремительного развития и внедрения цифровых технологий [1] возникает необходимость внедрения инновационных подходов управления, обеспечивающих эффективность принятия решений [2] на железнодорожном транспорте. В связи с этим актуальным направлением данного исследования является разработка модели формирования цифрового двойника железнодорожного участка, позволяющая повысить эффективность, безопасность и техническое обслуживание [3] перевозочного процесса.

Впервые концепция цифрового двойника была озвучена в 2003 году профессором Майклом Гривсом в Мичиганском университете, в соответствии с которой он – это цифровая копия одного или нескольких конкретных устройств, которая может абстрактно представлять реальное устройство и использоваться в качестве основы для тестирования в реальных или смоделированных условиях [4].

К основным причинам появления и развития концепции цифрового двойника можно отнести развитие технологий моделирования объектов в виртуальной среде, в системах автоматизированного производства и проектирования, управления жизненным циклом изделия и данными об изделии [5].

На основе анализа современных источников прослеживается эволюция понятия «цифровой двойник» и различные подходы к его трактовке – от простых виртуальных моделей до сложных интеллектуальных систем (таблица 1).

Исходя из анализа множества источников следует, что в них нет универсального термина для цифрового двойника, но можно выделить следующие задачи, которые решает цифровой двойник [11] применительно к железнодорожному участку:

- прогнозируемая и предсказательная аналитика (срок службы путей и колес);
- оптимизация производственных процессов (техническое обслуживание путей, стрелочных переводов, контактной сети);
- дистанционный мониторинг и управление (стрелочными переводами);
- обучение и симуляция (пропуск поездов);
- разработка и проектирование (реконструкция, ремонт пути);
- поддержание жизненного цикла продукта (стрелочного перевода).

Таблица 1 – Анализ определений цифрового двойника

Автор (источник)	Определение
Grievies M., Vickers J. [6]	Набор виртуальных информационных конструкций, которые полностью описывают потенциальный или фактический физически производимый продукт от микроатомного уровня до макрогеометрического уровня. В оптимальном случае любая информация, которую можно получить при проверке физического произведенного продукта, можно получить из его цифрового двойника
Боровков А. И. [7]	Это семейство сложных мультидисциплинарных математических моделей с высоким уровнем адекватности реальным материалам, реальным объектам, реальным 42 физико-механическим процессам, описываемых 3D нестационарными нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных
Сухомлин В. А., Намиот Д. Е., Гапанович Д. А. [8]	Цифровая копия конкретного физического объекта, которая отражает структуру, производительность, техническое состояние и характер рабочей миссии физического объекта, включая такие параметры, как, например, пройденные километры, возникшие неисправности, а также историю технического обслуживания и ремонта реального изделия
Liu Z., Meyendorf N., Mrad N. [9]	Живая модель физического актива или системы, которая постоянно адаптируется к операционным изменениям на основе собранных онлайн данных и информации и может прогнозировать будущее соответствующего физического аналога
Semeraro C. [10]	Набор адаптивных моделей, которые симулируют поведение физической системы в виртуальной системе, получая данные в реальном времени для обновления параллельно жизненному циклу этой системы. Цифровой двойник повторяет физическую систему для предсказания ошибок и возможностей для изменения, чтобы предписать действия в реальном времени по оптимизации или смягчению непредвиденных событий через наблюдение и оценки операционной профильной системы

Чтобы эффективно использовать в железнодорожном транспорте моделируемые объекты и системы цифровыми двойниками необходимо знать их характе-

ристики и типы. В исследовании [12] на основании анализа научных работ выделяются характеристики цифровых двойников, приведенные в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики цифровых двойников и их описание применительно к железнодорожному участку

Характеристика	Описание	Примеры
Физическая сущность	Физическая сущность (двойник), существующая в физической среде	Мост, стрелочный перевод, путь, рельс, шпала
Виртуальная сущность	Виртуальная сущность (двойник), существующая в виртуальной среде	Компьютерная модель моста, стрелочного перевода, пути, рельсов, шпал
Физическая среда	Среда, в которой существует физическая сущность (двойник)	Геометрические параметры и механические свойства земляной насыпи, состав почв, климатические условия, ветровые нагрузки
Виртуальная среда	Среда, в которой существует виртуальная сущность (двойник)	Цифровая платформа, серверное оборудование, математические модели, специальное ПО
Состояние	Измеренные значения всех параметров, соответствующих физической (виртуальной) сущности (двойнику) и его среде	Тип рельсов, геометрические, физические и механические параметры объектов путевой инфраструктуры, балластного слоя
Метрология	Процесс измерения состояния физической (виртуальной) сущности (двойника)	Точки измерения параметров рельсов, точность измерений, допустимые отклонения, качество
Реализация	Процесс, изменяющий состояние физической/виртуальной сущности (двойника)	Датчики параметров, вагон-измеритель, системы акустической диагностики
Синхронизация	Процесс синхронизации состояний физической и виртуальной сущности (двойника)	Каналы и технологии информационного обмена
Скорость синхронизации	Скорость, с которой происходит синхронизация	Объем информации, периодичность поступления информации
Физическо-виртуальное соединение	Соединение данных (процесс измерения) состояния физической сущности и реализации этого состояния в виртуальной сущности	Изменение температуры рельсов, геометрических параметров, наличия дефектов, параметры окружающей среды
Виртуально-физическое соединение	Соединение данных (процесс измерения) состояния виртуальной сущности/двойника/среды и реализации этого состояния в физической сущности/двойнике/среде)	Интерфейс визуализации, формы предоставления информации
Физические процессы	Процессы, в которых участвует физическая сущность двойника, и/или процессы, воздействующие на физическую сущность двойника или с ним взаимодействующие	Технология пропуска поездов, скорости движения поездов, выполнение ремонтных и строительно-монтажных работ
Виртуальные процессы	Процессы, в которых задействована виртуальная сущность (двойника), и/или процессы, воздействующие на виртуальную сущность (двойник) или с его помощью	Моделирование эксплуатационной нагрузки, оценка влияния инновационного подвижного состава на состояние путей, оценка возможности использования отдельных комплектующих, комплексная оценка скорости движения поездов и состояния пути на безопасность движения поездов

Для эффективной разработки и внедрения цифровых двойников в транспортной отрасли необходимо знать их технологическую структуру, которая включает следующие блоки [1]:

- модели данных – это данные, собранные с физических объектов, и виртуальные модели этих объектов;
- компоненты интеграции – обеспечивают взаимодействие между различными системами и платформами;
- системы управления – регулируют состояние и поведение цифровых двойников в режиме реального времени.

В зависимости от области построения выделяют следующие типы цифровых двойников [13]:

- продукта – виртуальная модель конкретного продукта, которая позволяет провести анализ поведения данного объекта в различных условиях реального мира

и повысить эффективность создания данного продукта с уменьшением затрат;

- процесса – виртуальная модель какого-либо процесса, позволяющая оптимизировать и разрабатывать наиболее эффективные методики для различных его этапов;
- системы – виртуальная модель системы, позволяющая оптимизировать как отдельные элементы, так и процессы в данной системе.

Таким образом, цифровой двойник железнодорожного участка представляет собой систему, состоящую из продуктов (рельсы, стрелочные переводы, мосты) и процессов этого участка (техническое обслуживание «продуктов» железнодорожного участка, перевозочный процесс).

Изучение применения цифровых двойников в различных отраслях показало их широкое использование, в

том числе и в транспорте. Большая часть исследований в области технологии цифрового двойника для транспортной инфраструктуры была сосредоточена на моделировании инфраструктуры, мониторинге и управлении в режиме реального времени, профилактическом обслуживании и управлении безопасностью [14].

В статье [15] представлен обзор применения цифровых двойников в управлении железнодорожной инфраструктурой на основе интеграции данных из различных источников, утверждения парадигм управления и обработки большого объема данных. В статье [16] предлагается использовать универсальный инструмент имитационного моделирования AnyLogic для построения цифрового двойника железнодорожного узла и представлена концепция интеграции его в интеллектуальную транспортную систему. В работе [17] рассмотрено применение цифровых двойников в проектировании, техническом обслуживании и повышении безопасности железных дорог. В статье [18] рассматривается внедрение цифровых двойников с использованием искусственного интеллекта и машинного обучения в железнодорожном секторе, направленное на техническое обслуживание железнодорожного транспорта. В исследовании [19] рассматривается разработка концептуальной платформы цифрового двойника железной дороги для обеспечения мониторинга большегрузных вагонов. В работе [20] для повышения надежности и безопасности железнодорожных перевозок предлагается использование цифровых двойников для технологического обслуживания стрелочных переводов.

В исследовании [21] отмечается применение цифровых двойников в железнодорожной отрасли по от-

дельным областям, таким как диагностика и прогнозирование неисправностей, техническое обслуживание железнодорожных транспортных средств, железнодорожной инфраструктуры, а весь в целом железнодорожный участок, как один цифровой двойник, который будет учитывать все области, не рассматривается.

С созданием и внедрением цифрового двойника для инфраструктуры всей железнодорожной сети Италии помогает компания Almapia. Он будет учитывать всю инфраструктуру, включая станции, туннели, мосты, сигналы, стрелочные переводы, оборудование для электрификации и ИТ-системы, которые всё это координируют. Информация о компонентах будет поступать с помощью датчиков GPS и камер. Цифровой двойник сможет обеспечивать обратную связь с его реальным аналогом [22].

Методология создания и внедрения цифрового двойника для железнодорожного участка включает сбор существующих данных и с датчиков, установленных по всей сети, включая поезда, пути, и станции, которые интегрируются в виртуальную модель с использованием передовых методов аналитики и моделирования, обеспечивая мониторинг в режиме реального времени, прогнозируя техническое обслуживание и оптимизируя эксплуатацию за счет зеркального отображения физической инфраструктуры и тестирования сценариев для повышения безопасности и эффективности [3].

На основе анализа работ [3, 24–26] предлагается модель создания и внедрения цифрового двойника железнодорожного участка, представленная на рисунке 1.



Рисунок 1 – Модель создания и внедрения цифрового двойника железнодорожного участка

Результаты исследования компании MarkNtel Advisors показывают, что мировой рынок цифровых двойников железных дорог с 2024 по 2030 год будет расти в среднем на 29,36 % [26].

В данной работе были рассмотрены решаемые задачи цифровыми двойниками, их характеристики, структура и типы. Выполнен обзор применения цифровых двойников в железнодорожной отрасли. Результаты исследования показывают, что цифровой двойник железнодорожного участка обладает большим потенциалом и будет важнейшим инструментом повышения эксплуатационной эффективности и безопасности перевозочного процесса.

В ходе разработки модели создания и внедрения цифрового двойника железнодорожного участка было выявлено, что для создания и функционирования цифровой модели необходимо большое количество данных, позволяющих отражать текущее состояние и предсказывать будущие изменения железнодорожного участка.

Для систематизации получения данных необходимо выполнить анализ технических и технологических параметров объектов путевой инфраструктуры железнодорожных участков, влияющих на организацию перевозочного процесса.

Дальнейшая исследовательская работа будет посвящена исследованию железнодорожных участков, их технических и технологических параметров, влияющих на технологию пропуска поездопотоков для разработки модели прогнозирования параметров перевозочного процесса на основе цифровых двойников железнодорожных участков.

Список литературы

- 1 **Абрамов, В. И.** Цифровые двойники: характеристики, типология, практики развития / В. И. Абрамов, В. В. Гордеев, А. Д. Столяров // Вопросы инновационной экономики. – 2024. – Т. 14, № 3. – С. 691–716. – DOI: 10.18334/vines.14.3.121484. – URL: <https://economic.ru/lib/121484> (дата обращения: 06.12.2025).
- 2 **Абрамов, В. И.** Анализ стратегий цифровой трансформации регионов России в контексте достижения национальных целей / В. И. Абрамов, В. Д. Андреев // Вопросы государственного и муниципального управления. – 2023. – № 1. – С. 89–119. – DOI: 10.17323/1999-5431-2023-0-1-89-119. – EDN JOKUIR. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_50407415_50208260.pdf (дата обращения: 06.10.2025).
- 4 **Wang, Z.** Digital Twin Technology / Z. Wang // Industry 4.0 Impact on Intelligent Logistics and Manufacturing, 2020. – URL: <https://www.intechopen.com/chapters/63861#B2> (date of access: 06.10.2025).
- 5 **Лычкина, Н. Н.** Концепция цифрового двойника и роль имитационных моделей в архитектуре цифрового двойника / Н. Н. Лычкина, В. В. Павлов // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2023) : сб. трудов одиннадцатой всерос. науч.-практ. конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности, Казань, 18–20 окт. 2023 г. – Казань : Издательство АН РТ, 2023. – С. 139–149. – EDN ZAOYZG. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_55948057_40746285.pdf (дата обращения: 06.10.2025).
- 6 **Grieves, M.** Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems / M. Grieves, J. Vickers // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems(eds) / J. Kahlen, S. Flumerfelt, A. Alves (eds.). – Springer : Cham, 2017. – P. 85–113. – URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4 (date of access: 06.10.2025).
- 7 **Боровков, А. И.** Цифровой двойник – опыт CompMech-Lab@ / А. И. Боровков. – URL: <https://nticenter.spbstu.ru/news/8023> (date of access: 06.12.2025).
- 8 **Сухомлин, В. А.** Анализ концепции развития цифровых двойников нового поколения / В. А. Сухомлин, Д. Е. Намиот, Д. А. Гапанович // Международный журнал открытых информационных технологий. – 2024. – Т. 12, № 7. – С. 119–130. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-tendentsiy-razvitiya-tsifrovyh-dvoynikov-novogo-pokoleniya/viewer> (дата обращения: 06.10.2025).
- 9 **Liu, Z.** The role of data fusion in predictive maintenance using digital twin / Z. Liu, N. Meyendorf, N. Mrad // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 37. – URL: <https://pism.com/10.1063/1.5031520> (date of access: 06.10.2025).
- 10 Digital twin paradigm: A systematic literature review / C. Semeraro, M. Lezoche, H. Panetto, M. Dassisti // Computers in Industry. – 2021. – Vol. 130. – P. 103469. – URL: https://www.researchgate.net/publication/351409715_Digital_Twin_Paradigm_A_Systematic_Literature_Review (date of access: 06.10.2025).
- 11 Энергосберегающая система управления нагревом заготовок в проходных печах двойного пользования технологии цифровой. – URL: https://www.chsu.ru/upload/iblock/74a/hnlelbbcfz6c1m2392dвуqjz0jtr8592/Диссер-тация_Нужин_Д.В.pdf (дата обращения: 07.10.2025).
- 12 Hicks Characterising the Digital Twin: A systematic literature review / D. Jones, C. Snider, A. Nassehi [et al.] // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2020. – P. 36–52. – URL: https://www.researchgate.net/publication/339802823_Characterising_the_Digital_Twin_A_systematic_literature_review (date of access: 07.12.2025).
- 13 **Madni, A. M.** Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering / A. M. Madni, C. C. Madni, S. D. Luccero // Systems. – 2019. – № 7 (1). – DOI: 10.3390/systems7010007. – URL: https://www.researchgate.net/publication/330749986_Leveraging_Digital_Twin_Technology_in_Model-Based_Systems_Engineering (date of access: 07.10.2025).
- 14 Digital Twin Technology in Transportation Infrastructure: A Comprehensive Survey of Current Applications, Challenges, and Future Directions / Di Wu, Ao Zheng, Wenshuai Yu [et al.] // Directions. Applied Sciences. – 2025. – № 15. – P. 1911. – DOI: 10.3390/app15041911. – URL: https://www.researchgate.net/publication/388925463_Digital_Twin_Technology_in_Transportation_Infrastructure_A_Comprehensive_Survey_of_Current_Applications_Challenges_and_Future_Directions (дата обращения: 10.10.2025).
- 15 The Potential for Digital Twin Applications in Railway Infrastructure Management / G. Doubell, K. Kruger, A. Basson, P. Conradie. – 2022. – DOI: 10.1007/978-3-030-96794-9_22. – URL: https://www.researchgate.net/publication/359487775_The_Potential_for_Digital_Twin_Applications_in_Railway_Infrastructure_Management (date of access: 10.10.2025).
- 16 Имитационные модели в цифровых двойниках железнодорожных узлов / А. Н. Рахмангулов, С. Н. Корнилов, П. Н. Мишкурин, Д. В. Александрин // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 3(55). – С. 43–59. – DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-43-59. – EDN HHJEEV. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_49939838_29806649.pdf (дата обращения: 10.10.2025).
- 17 Digital Twin for Railway: A Comprehensive Survey / S. Ghaboura, R. Ferdousi, F. Laamarti [et al.] // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 120237–120257. – DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3327042. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10292659/references> (date of access: 10.10.2025).
- 18 Towards AI-assisted digital twins for smart railways: preliminary guideline and reference architecture / L. De Donato,

R. Dirnfeld, A. Somma [et al.] / J Reliable Intell Environ. – 2003. – № 9. – P. 303–317. – URL: <https://doi.org/10.1007/s40860-023-00208-6> (date of access: 10.10.2025).

19 RailTwin: A Digital Twin Framework For Railway / R. Ferdousi, F. Laamarti, C. Yang, A. El Saddik // IEEE International Conference on Automation Science and Engineering. – 2022. – Vol. 2022-August – P. 1767–1772. 10.1109/CASE49997.2022.9926529. – URL: https://www.researchgate.net/publication/365104731_RailTwin_A_Digital_Twin_Framework_For_Railway (дата обращения: 12.10.2025).

20 Predictive maintenance for switch machine based on digital twins // Information / J. Yang, Y. Sun, Y. Cao [et al.] // Information. – 2021. – № 12(11). – P. 485. – DOI: 10.3390/info12110485. – URL: https://www.researchgate.net/publication/356676184_Predictive_Maintenance_for_Switch_Machine_Based_on_Digital_Twins (date of access: 12.10.2025).

21 **Werbińska-Wojciechowska, S.** Digital Twin Approach for Operation and Maintenance of Transportation System—Systematic Review / S. Werbińska-Wojciechowska, R. Giel, K. Winiarska // Italian National Conference on Sensors. – 2024. – № 24. – P. 6069. – URL: <https://www.preprints.org/manuscript/202408.0264> (date of access: 10.10.2025).

22 **Mangan, T.** How Digital Twin Technology is Helping Build a Smart Railway System in Italy/ T. Mangan. – URL: <https://www.nutanix.com/theforecastbynutanix/industry/how-digital-twin-technology-is-helping-build-a-smart-railway-system-in-italy> (date of access: 12.10.2025).

23 **Шевченко, Д. В.** Методология построения цифровых двойников на железнодорожном транспорте / Д. В. Шевченко // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). – 2021. – Т. 80, № 2. – С. 91–99. – URL: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-91-99> (дата обращения: 13.10.2025).

25 Цифровой двойник: концепция, уровни, связь с Интернетом вещей и роль численного и системного моделирования // Журнал «САПР и графика» 7-2020. – URL: <https://sapr.ru/article/26079> (дата обращения: 13.10.2025).

26 Цифровые двойники для прогнозирования отказов механизмов. – URL: <https://inner.su/articles/tsifrovye-dvoyniki-dlya-prognozirovaniya-otkazov-mekhanizmov/> (дата обращения: 10.10.2025).

27 Global Railway Digital Twin Market Research Report: Forecast (2024–2030) // ICT & Electronics, Apr. 2024. – URL: <https://www.marknteladvisors.com/research-library/railway-digital-twin-market.html> (date of access: 13.10.2025).

Получено 18.10.2025

A. A. Erofeev, D. V. Lyapovov. Theoretical approaches to the formation of digital doubles of railway sections.

The article describes theoretical approaches to the formation of a digital twin of a railway section. The definitions of digital doubles are analyzed and the tasks that the digital twin of the railway section solves are highlighted. The characteristics, types and structure of digital twins are considered. The aspects of the introduction and application of digital twins in the railway industry are described. A model for creating and implementing a digital twin of a railway section is presented and the directions of future research related to the analysis of technical and technological parameters of railway track infrastructure facilities affecting the organization of the transportation process are outlined.

УДК 656.222.3

А. А. ЕРОФЕЕВ, доктор технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, ХЭ ХУН, магистр технических наук, Железнодорожный политехнический институт Гуанчжоу, Китай

МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СХЕМ ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВОВ И ОСТАНОВОК ПОЕЗДОВ НА ПРИГОРОДНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЛИНИЯХ

Изучен мировой опыт оптимизации схем формирования составов и остановок поездов на пригородных железнодорожных линиях. Предложен новый метод комплексной оптимизации, который дополнительно учитывает ограничения по коэффициенту использования вместимости подвижного состава. Выполнена постановка задачи оптимизации расписания движения пригородных поездов с учётом схем формирования составов и режимов остановок. Формализовано описание фазовых, решающих переменных и константных величин модели. Предложена модель оптимизации расписания движения поездов, сформулирована целевая функция модели. Описаны конструктивные ограничения модели, которые включают число вагонов в составе поезда, коэффициент загрузки, частоту обслуживания направлений, ограничения по остановкам. Для поиска оптимального решения задачи предложено использовать генетический алгоритм.

Неравномерное пространственно-временное распределение пассажиропотока на начальном этапе эксплуатации пригородных железнодорожных линий и использование единых схем формирования составов зачастую приводят к потере пропускной способности и нерациональным эксплуатационным затратам. В связи с этим актуальной задачей исследования является разработка вариантов организации движения поездов с различными схемами формирования поездов (различной вместимости) и различными режимами остановок в пути следования. Целью является минимизация суммарных эксплуатационных затрат, а переменными выступают размеры движения поездов, вместимость составов и режимы остановок.

В связи со сложностью и многовариантностью решаемой задачи для получения суточного расписания движения поездов с разной конфигурацией составов предлагается построить математическую модель, в основе которой лежит генетический алгоритм.

История изучения и решения проблемы оптимизации расписания движения пригородных и городских пассажирских поездов в Китае

В настоящее время уровень заполняемости поездов на пригородных и городских железных линиях в Китае, особенно в начальные периоды эксплуатации, является относительно низким: в часы пик заполняемость достигает 70 %, а отдельных поездов в непиковое время – менее 20 %, что приводит к убыткам железнодорожных компаний [1, 2]. Причины этого заключаются, с одной стороны, в том, что большинство пригородных железнодорожных линий в Китае все еще находится на стадии формирования пассажиропотока, и этот процесс длительный, пассажиропоток растет медленно; с другой стороны, из-за однородного расписания движения поездов, неизменной композиции составов, а также из-за значительных интервалов между поездами, режим эксплуатации не соответствует существующему пассажиропотоку [3, 4].

Поскольку участки железных дорог фиксированы, а скорость поездов относительно одинакова, исследования по оптимизации расписания движения пригородных и городских поездов в основном сосредоточены на выборе рациональных интервалов отправления, композиции составов поездов (вместимости) и схемах

остановок на промежуточных станциях, а в качестве целевой функции выступает минимизация эксплуатационных расходов компании [5, 6].

Для нахождения наилучшего компромиссного варианта плана обслуживания поездов Yu Hern Chang и др. [7] предложили метод нечеткого математического программирования. В качестве исходных данных при этом использовались данные о пассажиропотоке, а в качестве целевой функции – минимизация эксплуатационных расходов компании и минимизация времени поездки пассажиров. В рамках модели ученые оптимизировали схемы остановок поездов, частоту движения и количество отправляемых поездов.

В исследовании [8], учитывая стоимость времени ожидания пассажиров, стоимость времени в пути, показана модель оптимизации частоты отправления поездов с целью минимизации расходов на поездку пассажиров и эксплуатационных расходов компании.

Claessens M. T. и др. [9] предложили модель оптимизации с учетом эксплуатационных расходов компании, оптимизировали частоту движения поездов и количество вагонов, применив модель к подсети железной дороги Нидерландов, что позволило существенно снизить эксплуатационные расходы. Учитывая маршруты поездов, типы поездов, схемы остановок и ограничения пассажиропотока, в [10] построена модель оптимизации схемы движения поездов городских железнодорожных линий с целью минимизации количества используемых поездов. В исследовании [11] проанализирован процесс определения схемы движения поездов и предложен метод оптимизации схемы движения за счет объединения потоков поездов. Wang Zhengbin и др. [12] создали модель оптимизации схемы движения городских поездов и разработали гибридный генетический алгоритм для решения задачи, которые рассчитывают суммарное время ожидания пассажиров и время стоянки на станциях в зависимости от частоты обслуживания, спроса (пассажиропотока) и схем остановок.

Таким образом, в вышеуказанной литературе рассматривалась оптимизация схем движения и композиций составов поездов, однако исследования в основном использовали минимизацию общей стоимости в качестве целевой функции модели, не включая опти-

мизацию коэффициента использования вместимости поездов.

На основе указанного анализа предлагается рассмотреть задачу с точки зрения операционных расходов на организацию движения поездов, с учётом пространственно-временных характеристик пассажиропотока на линии, учитывать влияния изменяющегося во времени пассажиропотока, верхнего и нижнего пределов числа рейсов, частоты обслуживания, коэффициента заполненности поездов и других ограничений. Предлагается сформулировать модель комплексной оптимизации схем формирования составов и схем остановок поездов с целью снижения эксплуатационных расходов и увеличения коэффициента заполненности поездов при условии полного удовлетворения существующего на линии пассажиропотока.

Постановка задачи оптимизации расписания движения пригородных поездов с учётом схем формирования составов и режима остановок

Расстояние передвижения пассажиров на пригородных и городских железнодорожных линиях в Китае обычно составляет от 30 до 100 км, а пассажиропоток характеризуется высокой периодичностью, проявляющейся в виде распределения по неделям и дням. Ежедневные пиковые часы приходятся на время с 7:00 до 9:00 утра и с 17:00 до 19:00 вечером. Час пик в течение недели – с пятницы по понедельник, особенно вечером в пятницу и утром в понедельник. Пиковые часы в субботу и воскресенье в основном связаны с поездками и посещением родственников. Таким образом, характеристики пассажиропотока пригородных железных дорог сочетают черты как традиционных железных дорог, так и городского транспорта. На начальном этапе эксплуатации таких линий, когда пассажиропоток находится в стадии формирования и остаётся низким, применение традиционной схемы движения поездов с единым составом и едиными остановками не соответствует реальному пассажиропотоку, что приводит к низкой заполненности вагонов и неэффективному использованию перевозочного потенциала. На основе этого в качестве объекта исследования выбран режим движения поездов в одном направлении на начальном этапе эксплуатации пригородной железнодорожной линии. С целью минимизации эксплуатационных затрат поездов оптимизация режима движения осуществляется по двум направлениям – составу поездов и схеме остановок (рисунок 1).

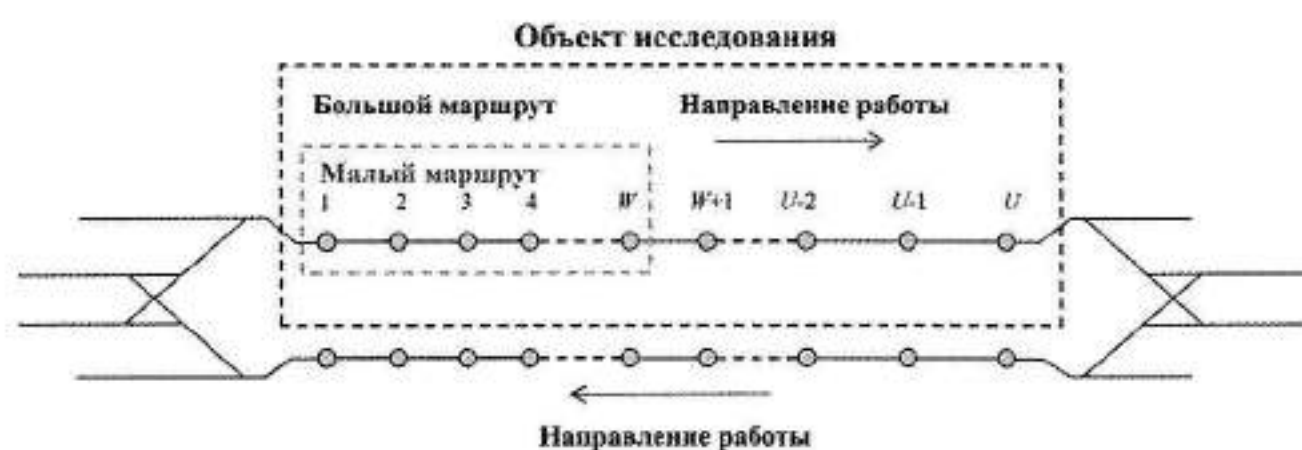


Рисунок 1 – Оптимизация графика движения пригородной железнодорожной линии

Параметры модели задаются следующим образом.

1 Фазовые переменные. Обозначим множество станций $U = \{u|1, 2, \dots, U\} = W + B$, где $W = \{w|1, 2, \dots,$

$W\}$ – множество станций, входящих в сокращенный маршрут, а $B = \{b|1, 2, \dots, B\}$ – множество станций, оставшихся после исключения станций, входящих в сокращенный маршрут. Обозначим множество типов составов поезда $K = \{k|1, 2, \dots, K\}$ и множество поездов $R = \{r|1, 2, \dots, R\}$, где r – номер каждого поезда в расписании, а R – общее число поездов.

2 Решающие переменные. f_k – количество поездов, использующих состав типа k ; $\alpha_{k,u}^r$ – показатель, отображающий, останавливается ли поезд r с типом формирования k на станции u (переменная типа 0–1).

3 Константные величины. g_k – количество вагонов для состава типа k ; C_l – стоимость эксплуатации каждого транспортного средства на километр, юаней; C_s – стоимость остановки каждого транспортного средства за каждую остановку, юаней; L – общая протяжённость пригородной железнодорожной линии, км; L_1 – длина сокращенного маршрута, км; L_2 – общий пробег за вычетом пробега по сокращенному маршруту, км; C – вместимость транспортного средства, чел.

При построении модели решения исследуемой задачи предполагаются следующее допущения:

1 Исследуемая пригородная железнодорожная линия представляет собой прямолинейную трассу с парным движением поездов; оптимизация осуществляется только в одном направлении при высоком пассажиропотоке, при этом не учитывается вопрос о последовательном соединении поездов.

2 Учитывается только пассажиропоток на данной линии, пассажиропоток между линиями не учитывается.

3 Пассажиры выбирают только поезд, останавливающийся в обоих пунктах их поездки, и не совершают пересадки.

4 Известен режим прибытия пассажиров, при котором применяется принцип приоритетного обслуживания первых прибывших.

5 Поезд не переходит на другие пути.

6 Организационная модель эксплуатации предусматривает работу по полному и сокращенному маршрутам.

Модель оптимизации расписания движения поездов

Предлагается оптимизационная модель расписания движения поездов различной композиции, которая учитывает характеристики пассажиропотока на начальном этапе эксплуатации пригородной линии. В качестве целевой функции выступает минимизация эксплуатационных затрат с учётом таких ограничений, как количество отправляемых поездов, коэффициент заполнения вагонов, частота обслуживания пунктов назначения (режим остановок) и количество остановок.

Эксплуатационные расходы включают затраты на движение и остановки. К расходам на движение относятся энергопотребление поезда, включая электроэнергию, а также расходы на эксплуатацию железнодорожных путей. Эти расходы зависят от пробега поезда и стоимости его эксплуатации на километр. Стоимость остановки поезда – это расходы, возникающие при остановке поезда на станции, которые зависят от количества остановок и стоимости каждой из них [13].

Целевая функция имеет вид:

$$\min Z = \sum_{r=1}^{f_1} g_1(L_1 + \varepsilon_r L_2)C_l + \sum_{k=1}^{K-1} \sum_{r=f_k}^{f_k+f_{k+1}} g_{k+1} \times$$

$$\times (L_1 + \varepsilon_r L_2)C_l + \sum_{r=1}^{f_1} \left[g_1 \left(\sum_{u=1}^W a_{1,u}^r + \varepsilon_r \sum_{u=W+1}^U a_{1,u}^r \right) C_s \right] +$$

$$+ \sum_{k=1}^{K-1} \sum_{r=f_k}^{f_k+f_{k+1}} \left[g_{k+1} \left(\sum_{u=1}^W a_{k,u}^r + \varepsilon_r \sum_{u=W+1}^U a_{k,u}^r \right) C_s \right], \quad (1)$$

где ε_r – переменные 0 и 1, обозначающие маршрут движения поезда,

$$\varepsilon_r = \begin{cases} 1, & \text{поезд } r \text{ следует по полному маршруту} \\ 0, & \text{поезд } r \text{ следует по сокращенному маршруту} \end{cases};$$

$a_{k,u}^r$ – переменные 0 и 1, указывающие на остановку поезда,

$$a_{k,u}^r = \begin{cases} 1, & \text{поезд } r \text{ составом типа } k \\ & \text{останавливается на станции} \\ 0, & \text{поезд } r \text{ составом типа } k \text{ проследует станцию } u \\ & \text{без остановки} \end{cases}$$

Конструктивные ограничения модели включают число вагонов в составе поезда, коэффициент загрузки поезда, частоту обслуживания направлений, ограничения по остановкам.

1 *Ограничение количества отправлений по числу вагонов.* С учётом операционных затрат и учётом необходимости отправления поездов в различной составности в пиковые часы, для любого временного интервала устанавливаются верхние и нижние пределы количества отправлений:

$$\sum_{k=1}^k f_k \leq f_{\max}; \quad (2)$$

$$f_k \geq f_{\min}, \quad (3)$$

где f_{\max} – максимальное количество поездов, находящихся в этот период эксплуатации; f_{\min} – минимальное количество поездов различных типов, находящихся в эксплуатации.

2 *Ограничение коэффициента загрузки.* На основе спроса на пассажиропоток рассчитывается пассажиропоток в поперечном сечении (на каждом перегоне отдельно), а затем – коэффициент загрузки в этом сечении. С учётом нормативной вместимости поездов необходимо установить верхний и нижний пределы коэффициента загрузки:

$$\eta_d = \frac{\sum_{i=1}^d \sum_{j=d+1}^U q_{i,j}}{\sum_{k=1}^K f_k g_k c} \leq \eta_{\max}; \quad (4)$$

$$\frac{\sum_{d=1}^U \eta_d}{N-1} \geq \eta_{\min}, \quad (5)$$

где η_d – предел для коэффициента d полной нагрузки сечения интервала, %; C – количество пассажиров в транспортном средстве, чел; $q_{i,j}$ – поток i пассажиров j между станциями, чел.

3 *Ограничение частоты остановок.* С учётом возможных изменений в схеме остановок, которые могут повлиять на время ожидания пассажиров на различных станциях, для удовлетворения потребностей пассажиров в передвижении установлено ограничение частоты остановок: количество остановок поездов на соответствующей станции не должно быть меньше минимального значения

$$\sum_{r=1}^{f_1} a_{1,i}^r a_{1,j}^r + \sum_{k=1}^{K-1} \sum_{r=f_k}^{f_k+f_{k+1}} a_{k,i}^r a_{k,j}^r \geq \frac{q_{i,j}}{\min(q^i, q^j)}, \quad (6)$$

где q^i – поток пассажиров на станции i , чел; q^j – поток пассажиров на станции j , чел;

4 *Ограничение по остановкам на полном и сокращенном маршрутах.* Маршрут движения поезда делится на две части – полный и сокращённый, а режим остановки на станциях – на три: остановка на крупной зонной станции, остановка на каждой станции и остановка по выбору. В зависимости от маршрута и требований к остановкам на станциях конкретные ограничения остановок поезда определяются следующим образом: для поездов на сокращенных маршрутах допускаются три варианта – остановка на каждой станции, остановка на первой и последней станции зоны обслуживания, а также выбор одной станции посреди маршрута; для поездов на полном маршруте – три варианта: остановка на каждой станции, на зонных станциях, на двух станциях на маршруте следования. Данные параметры могут изменяться в процессе моделирования. Конкретные ограничения остановок поезда приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Режимы остановок поездов

Номер станции		1	2	3	...	W	W+1	...	U	
Сокращенный маршрут	Пересадка на начальной и конечной станциях	1	0	0	0	1	0	0	0	
	Остановка на одной из станций	1	1 (обозначает, что поезд останавливается только на одной из станций, расположенных между станцией 2 и станцией W-1)				1	0	0	0
	Остановка на каждой станции	1	1	1	1	1	0	0	0	
Полный маршрут	Остановка на зонной станции	1	0	0	0	1	0	0	1	
	Остановка на двух станциях	1	1 (обозначает, что поезд останавливается только на одной из станций, расположенных между станцией 2 и станцией W-1)				1	1 (обозначает, что поезд останавливается только на одной из станций – от W-1 до U-1)		
	Остановка на каждой станции	1	1	1	1	1	1	1	1	

Примечание – 0 – поезд не останавливается на этой станции; 1 – поезд останавливается на этой станции.

5 Ограничение значений g_{jk} целых переменных: все значения должны быть положительными целыми числами.

Для поиска оптимального решения задачи может применяться генетический алгоритм. Благодаря широкому охвату и высокой степени проникновения в пространство возможных решений, он обладает хорошей глобальной сходимостью и способен быстро находить удовлетворительные решения.

В дальнейших исследованиях предполагается построение модели комплексной оптимизации схем формирования составов и остановок поездов для пригородных железнодорожных линий Китая.

Список литературы

1 Цзян Минмэй. Исследование оптимизации схем остановки поездов междугородних железных дорог / Цзян Минмэй. – Пекин : Пекинский транспортный университет, 2015.

2 Сун Жэньцзе. Исследование пригородных поездов междугородних железных дорог на основе характеристик пассажирских поездов между Пекином и Тяньцзинем / Сун Жэньцзе, Лу Юань // Умный город. – 2017. – № 6. – С. 63–64.

3 Янг Сяоянь. Анализ характеристик пассажирских поездов на поездках между Чэнду, Мянъян и Лешань / Янг Сяоянь. – Пекин : Пекинский транспортный университет, 2011.

4 Тянь Юлу. Оптимизация схем запуска стандартных поездов на междугородней железной дороге Чанжу Тан / Тянь Юлу // Умный город. – 2020. – № 20. – С. 11–13.

5 Хуан Чжипэн. Схемы запуска междугородних поездов на основе удовлетворенности временем поездки / Хуан Чжипэн // Журнал Ланьчжоуского транспортного университета. – 2018. – № 37 (01).

6 Хуан Чжипэн. Исследование схем запуска междугородних поездов на основе выбора поведения пассажиров / Хуан Чжипэн // Журнал Уханьского политехнического университета (Транспортная наука и инженерия). – 2015. – № 6.

7 Chang, Y. H. Многокритериальная модель планирования обслуживания пассажирских поездов: применение к высокоскоростной железной дороге Тайваня / Y. H. Chang CH. Yeh, C. C. Shen // Transportation Research Part B: Methodological. – 2000. – № 34 (2). – P. 91–106.

8 Хэ Бишэн. Исследование теории и методов координационной оптимизации схем запуска поездов и графиков движения высокоскоростных железных дорог / Хэ Бишэн. – Пекин : Пекинский транспортный университет, 2014.

9 Claessens, M. T. Оптимальное распределение пассажирских железнодорожных линий с точки зрения затрат / M. T. Claessens, N. M. V. Dijk, P. J. Zwaneveld // European Journal of Operational Research. – 2007. – № 110 (3). – P. 474–489.

10 Goossens Aab, J. W. Решение задач планирования железнодорожных линий нескольких типов / J. W. Aab Goossens // European Journal of Operational Research. – 2006. – № 168 (2). – P. 403–424.

11 Сюй Жуйхуа. Исследование методов оптимизации схем запуска поездов на пассажирских линиях / Сюй Жуйхуа, Цоу Сяолэй // Журнал Университета Тунцзи (Естественные науки). – 2005. – № 33 (2). – С. 1608–1611.

12 Ван Чжэнбин. Модель и алгоритм планирования движения поездов на межгородской пассажирской линии / Ван Чжэнбин, Ма Цзы // Журнал транспортной инженерии и информатики. – 2017. – № 15 (01). – С. 28–33.

13 Лю Сун. Исследование эффективности планирования движения многосоставных поездов на межгородских железных дорогах / Лю Сун. – Пекин : Пекинский транспортный университет, 2020.

Получено 27.10.2025

A. A. Erofeev, He Hong. The model for comprehensive optimization of train formation and stop patterns on suburban railway lines.

Global experience in optimizing train formation and stop patterns on commuter rail lines is studied. The new method of integrated optimization is proposed that additionally takes into account limitations on the rolling stock capacity utilization rate. The commuter train schedule optimization problem is formulated taking into account train formation patterns and stop modes. The description of the phase, decision variables, and constant values of the model is formalized. The train schedule optimization model is proposed, and the model's objective function is formulated. The design constraints of the model are described, which include the number of cars in a train, the load factor, the frequency of service on different routes, and stop restrictions. A genetic algorithm is proposed for finding the optimal solution to the problem.

УДК 656.222.3

ХЭ ХУН, магистр технических наук, Железнодорожный политехнический институт Гуанчжоу, Китай

МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМ ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВОВ И РЕЖИМОВ ОСТАНОВОК ПОЕЗДОВ НА ПРИГОРОДНОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ЛИНИИ ГУАНЧЖОУ – ЦИНХАЙ И ВОСТОЧНОЙ КОЛЬЦЕВОЙ ЛИНИИ ГУАНЧЖОУ

Выполнено моделирование схем формирования составов и режимов остановок поездов. На примере пригородных железнодорожных линий Гуанчжоу – Цинхай и восточной кольцевой линии показано, что по сравнению с текущим расписанием предложенный вариант остановок поездов разной составности позволяет снизить эксплуатационные затраты на 59 %, а средний коэффициент полной загрузки на перегоне увеличивается с 0,2888 до 0,8665. Это указывает на эффективность данного подхода в снижении затрат и повышении коэффициента загрузки.

На начальном этапе эксплуатации пригородных железнодорожных линий зачастую возникают нерациональные эксплуатационные затраты, связанные с низкой заполняемостью поездов и выбором нерациональных режимов их остановок в пути следования. В связи с этим актуальной задачей исследования является формирование вариантов организации движения поездов с различными схемами формирования поездов и различными режимами остановок в пути следования.

Для решения данной задачи предлагается использовать модель, в основе которой лежит поиск оптимальных решений с использованием генетического алгоритма. Благодаря широкому охвату и высокой степени проникновения в пространство возможных решений он обладает хорошей глобальной сходимостью и способен быстро находить удовлетворительные решения. С использованием двоичного кодирования тип состава поездов и наличие остановок на каждой станции кодируются с помощью переменных 0 и 1. Таким образом, тип состава и последовательность остановок каждого поезда образуют хромосому.

В качестве примера рассматриваются междугородние железные дороги Гуанчжоу – Цинхай и восточная кольцевая линия Гуанчжоу, открытые 30 ноября 2020 года.

1 Общие сведения о пригородной железнодорожной линии Гуанчжоу – Цинхай и восточной кольцевой линии Гуанчжоу.

Пригородная железнодорожная линия Гуанчжоу – Цинъюань (Хуаду – Цинъюань) и Восточная кольцевая линия Гуанчжоу (северный выход аэропорта Байюнь – станция Хуаду) управляются и эксплуатируются компанией «Гуандунская пригородная железнодорожная компания», дочерней компанией Группы метрополитена Гуанчжоу. Обе линии пересекаются на станции Хуаду и работают по схеме «Гуанчжоу – Цинъюань + Восточный кольцевой маршрут Гуанчжоу», соединяя город Гуанчжоу с городом Цинъюань. Общая протяжённость линии составляет около 60,8 км, на ней расположено 9 станций. (рисунок 1).

Данные линии обслуживают восьмивагонные составы. Существуют два варианта остановок: остановки на крупных зонных станциях (Цинчэн, Хуаду, аэропорт Байюнь-север) и остановки на всех станциях. Для удобства последующих расчётов станции железно-

рожных линий последовательно пронумерованы от 1 до 9 в направлении от Цинчэна к аэропорту Байюнь-север.

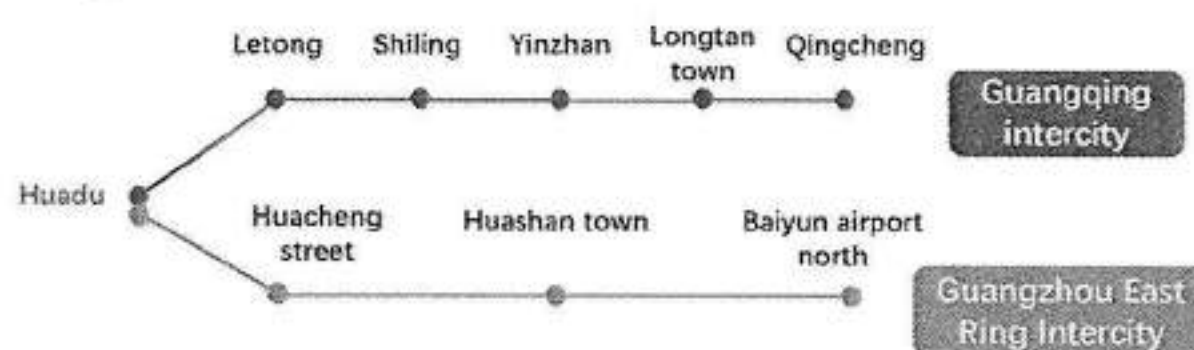


Рисунок 1 – Маршруты пригородной железнодорожной линии Гуанчжоу – Цинхай и восточной кольцевой линии Гуанчжоу

На основе статистических данных о пассажиропотоках за один день для данных маршрутов установлены часовые пассажиропотоки (рисунок 2).

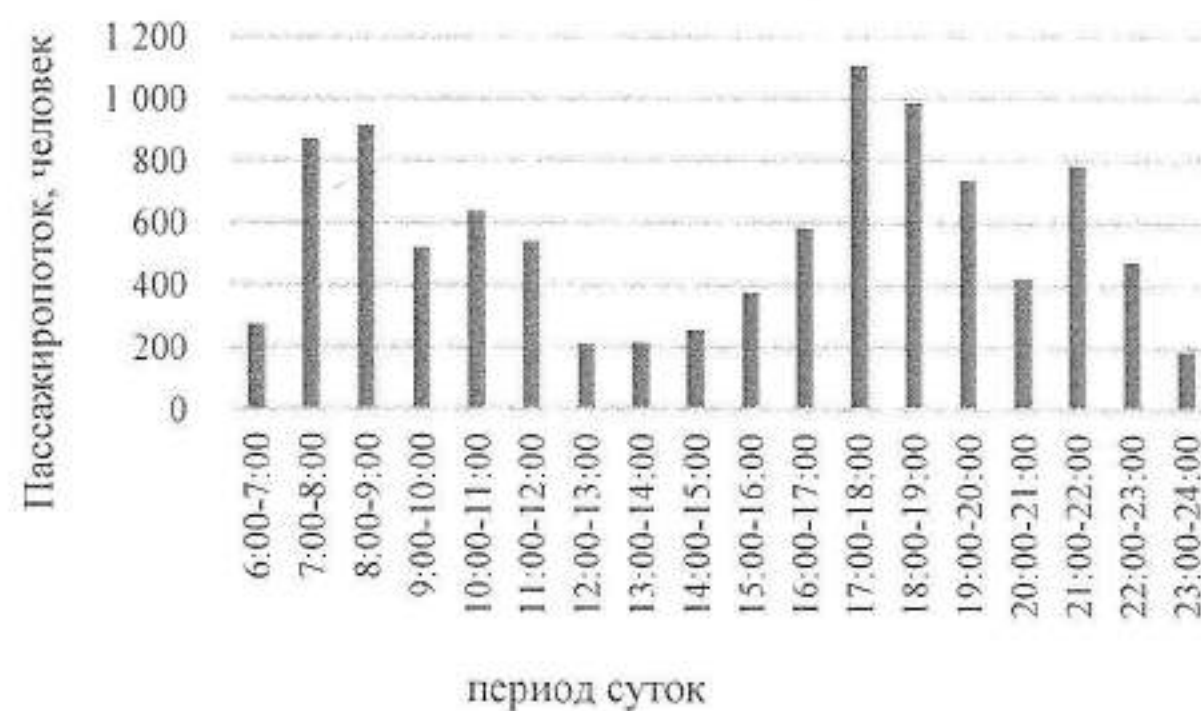


Рисунок 2 – Распределение пассажиропотока по часам суток

Как видно из приведённой на рисунке 2 диаграммы, пассажиропоток на этом междугороднем железнодорожном маршруте в течение суток демонстрирует явные колебания, в целом проявляясь в виде двух пиков и трёх падений. Пиковые периоды – с 7:00 до 11:00 и с 17:00 до 19:00. Падения наблюдаются в периоды с 6:00 до 7:00, с 12:00 до 15:00 и с 23:00 до 6:00 следующего дня.

На основе данных о посадке-высадке пассажиров на станциях участков построена поперечная диаграмма пассажиропотоков (рисунок 3). Как видно из рисунка 3, наибольший пассажиропоток наблюдается на перегонах 5–6 и 6–7.

Таким образом, пассажиропоток на пригородной железнодорожной линии Гуанчжоу – Цинъюань и Восточной кольцевой линии Гуанчжоу характеризуется неравномерным пространственно-временным распре-

делением, при этом наибольший объём пассажиров приходится на утренние и вечерние пиковые часы. Распределение по станциям посадки-высадки также неравномерно: подавляющее большинство пассажиров совершают поездки между крупными зонными станциями, тогда как пассажиропоток на промежуточных станциях остаётся относительно низким.

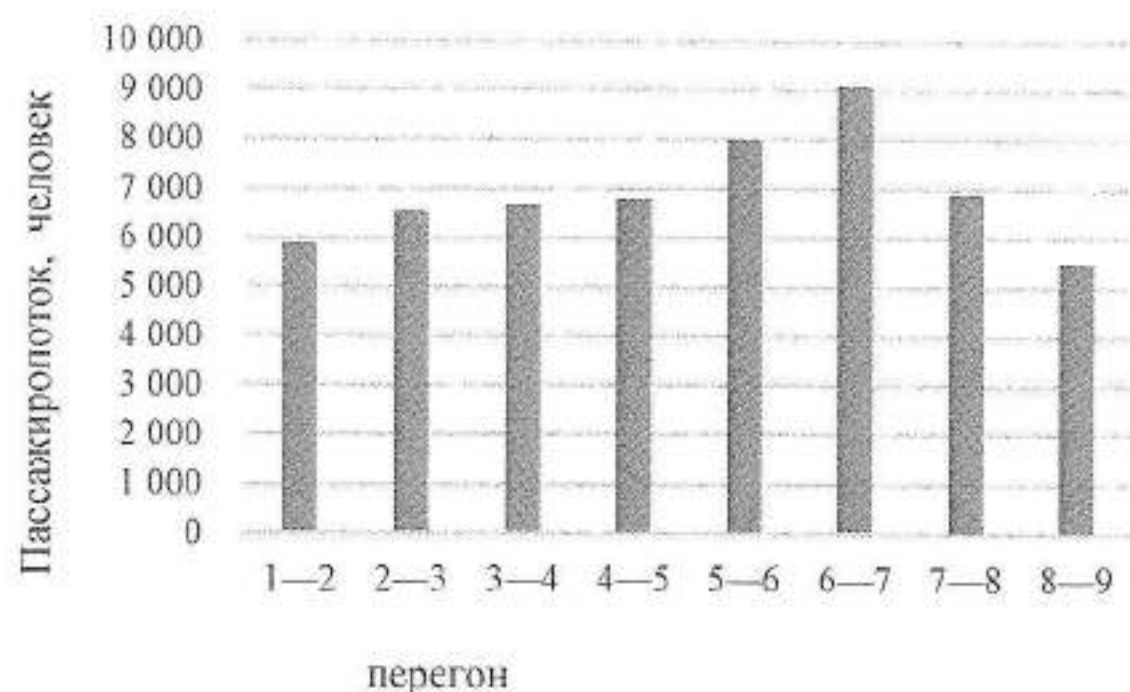


Рисунок 3 – Поперегонная диаграмма пассажиропотоков

2 Настройка параметров модели

Разработана модель выбора оптимальных вариантов организации движения поездов с различными схемами формирования и различными режимами остановок в пути следования. Для выбора вариантов решения используется генетический алгоритм.

Параметры модели определяются в соответствии с «Нормами проектирования междугородных железных дорог», конкретными условиями маршрута, нормативами эксплуатации междугородных железных дорог [1, 2]. Основные исходные параметры модели приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения параметров модели

Параметр	Значение
Стоимость эксплуатации подвижного состава C_p , юань/км·ч	10
Стоимость остановки одного состава C_s , юань/состав	100
Номинальная вместимость каждого вагона C , чел.	66
Общая протяжённость линии L , км	59,6
Верхний предел коэффициента загрузки подвижного состава η_{max} , %	100
Нижний предел коэффициента загрузки подвижного состава η_{min} , %	20
Максимальное число вагонов в одном составе f_{max} , ваг.	8
Минимальное число вагонов при отправлении состава 1-го типа f_{1min} , ваг.	1
Минимальное число вагонов при отправлении состава 2-го типа f_{2min} , ваг.	1
Максимальный поток пассажиров, одновременно выполняющих посадку в состав 1-го типа q_1 , чел./состав	200
Максимальный поток пассажиров, одновременно выполняющих посадку в состав 2-го типа q_2 , чел./состав	75
Количество вагонов в составе 1-го типа g_1 , ваг.	8
Количество вагонов в составе 2-го типа g_2 , ваг.	4

Для определения загрузки составов в модели выполнен анализ распределения посадки-высадки пассажиров на станциях участков. Данные получены за ве-

черный пиковый период (вторник, 19 января 2021 года, с 17:00 до 19:00) и представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Распределение посадки/высадки пассажиров в вечерний пиковый период (17:00–19:00)

OD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Итого
1	–	14	18	18	8	86	30	32	68	274
2		–	0	14	0	18	8	0	18	58
3			–	0	2	16	4	0	12	34
4				–	6	50	8	6	24	94
5					–	34	4	0	12	50
6						–	118	76	148	342
7							–	8	42	50
8								–	13	26
9									–	0
Итого	0	14	18	32	16	204	172	122	350	928

3 Результаты моделирования

Сходимость алгоритма. На основе построенной модели и алгоритма были сгенерированы схемы движения поездов с разными составами по маршрутам пригородных линий Гуанчжоу – Цинчжоу и Гуанчжоу – Дунхуань. Итерационная сходимость генетического алгоритма модели показана на рисунке 4.

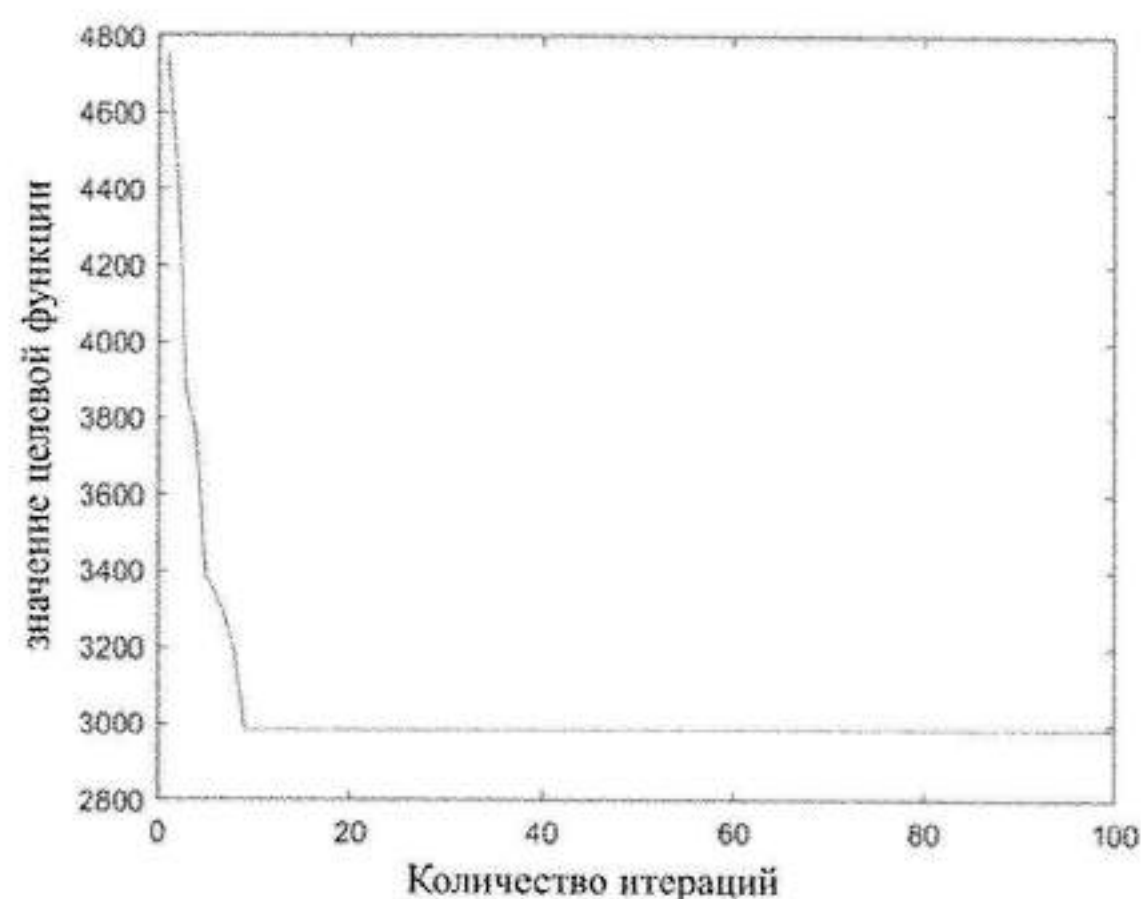


Рисунок 4 – Итерации генетического алгоритма и его сходимость

Использование генетического алгоритма для решения данной модели обладает высокой сходимостью, эффективно решает задачу по определению схем движения поездов с разными размерами маршрутов и составов в различных режимах остановок, характеризуется высокой эффективностью вычислений. Параметры модели, включая количество итераций, настроены эффективно, что обеспечивает достижение локального оптимума.

Результаты оптимизации модели. С использованием модели оптимизации установлено расписание движения поездов, их составность и режимы стоянок. В пиковые часы рекомендуется запускать 2 поезда по 4 вагона и 1 поезд по 8 вагонов (таблица 3). При этом в действующем расписании, предусматривается 6 поездов по 8 вагонов (таблица 4). Оптимизация эксплуата-

ционных затрат на движение поездов достигает 59 %, а оптимизация коэффициента использования вместимости подвижного состава – 200 %. (таблица 5).

Таблица 3 – Предлагаемый вариант организации движения поездов в часы пик

Поезд	Станция									Количество вагонов в составе
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	4
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
3	0	0	0	0	0	1	1	0	1	4

Примечание – 0 – поезд не останавливается на этой станции; 1 – поезд останавливается на этой станции.

Таблица 4 – Существующий вариант организации движения поездов в часы пик

Поезд	Станция									Количество вагонов в составе
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	8
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
3	1	0	0	0	0	1	0	0	0	8
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
5	1	0	0	0	0	1	0	0	0	8
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8

Таблица 5 – Результаты оптимизации расписания движения поездов

Показатель	Современное положение	Результат оптимизации	Оптимизированный объем	Коэффициент оптимизации
Эксплуатационные расходы, юань	6270	2560	-3710	59
Коэффициент использования вместимости подвижного состава, %	28,9	86,7	+57,8	200

Получено 27.09.2025

He Hong. Modeling of train formation schemes and train stopping modes on the Guangzhou–Qinghai commuter railway line and the Guangzhou Eastern Circle Line.

Modeling of train formation schemes and train stopping modes was conducted. Using the Guangzhou – Qinghai commuter rail line and the Eastern Circle Line as examples, it was shown that, compared to the current schedule, the proposed stopping option for trains with different train configurations reduces operating costs by 59 %, while the average full load factor on the section increases from 0,2888 to 0,8665, demonstrating the effectiveness of this approach in reducing costs and increasing the load factor.

Оптимизация схемы остановок, реализованная в модели, позволяет улучшить работу железнодорожных маршрутов. До оптимизации на пригородной линии Гуанчжоу – Цинчэн и на восточной кольцевой линии Гуанчжоу следовали только прямые поезда с остановками на всех станциях (см. таблицу 4). После оптимизации для одного поезда предусматриваются остановки на всех станциях и для двух – только на зонных станциях (станции Хуаду – Хуачэнцзе – Байюнь-Аэропорт Север и Хуаду – Хуашаньчжэнь – Байюнь-Аэропорт Север), что позволяет лучше соответствовать реальным мощностям пассажиропотоков.

Вопросы оптимизации составности поездов и режимов их остановок имеют важное значение с точки зрения эксплуатационных затрат. Предложенная модель оптимизации расписания движения по сравнению с действующим расписанием позволяет снизить эксплуатационные расходы на 59 % и повысить коэффициент средней загрузки подвижного состава с 0,2888 до 0,8665. По мере развития инфраструктуры и оборудования вдоль новых пригородных линий будет постепенно формироваться спрос на пассажирские перевозки, что потребует корректировки расписания движения поездов, их режимов стоянок и составности.

Список литературы

- 1 Исследование оптимизации частоты движения межгородских поездов на основе деления по временным периодам / Мяо Вэньлинь, Ни Шаоцюань, Пэн Тин, Ван Вэньсянь // Железнодорожные перевозки и экономика. – 2017. – 39 (3).
- 2 Би Яньсян. Анализ влияния смешанного движения поездов с различным составом на линиях быстрого городского рельсового транспорта / Би Яньсян, Лю Цзяхуа, Цзян Чжибин // Исследования городского рельсового транспорта. – 2006. – 9 (12). – С. 54–57.

УДК 656.21

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

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСОНАЛОМ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Приведены результаты исследований системы управления персоналом подразделений железной дороги при выполнении пассажирских перевозок. Анализируются методические основы расчёта численности персонала подразделений пассажирского хозяйства железной дороги в новых условиях функционирования транспорта в зависимости от функциональной нагрузки на них. Рассматриваются варианты организации служебного и административного персонала при выполнении пассажирских перевозок. Оценивается динамика изменения персонала в зависимости от объёма перевозок, структуры пассажиропотока, предоставления услуг, выполнения технического регламента с подвижным составом и инфраструктурой.

Введение. В современных условиях пассажирское хозяйство железнодорожного транспорта обеспечивает перевозки населения, багажа во всех видах сообщений, а также предоставление пассажирам комплекса услуг, необходимых для осуществления поездок в условиях максимально возможной комфортности в поездах и на вокзалах. В пассажирском хозяйстве железной дороги работает 11–12 тыс. чел. Численность сотрудников, занятых в сфере пассажирских перевозок, зависит от функциональной структуры пассажирского хозяйства. В неё включены пассажирские станции, вокзалы; пассажирские вагонные депо; вагонные и пассажирские участки с ремонтно-экипировочными депо. Структура пассажирского хозяйства в значительной мере является постоянной и частично зависит от объёма перевозок пассажиров. С этим связана низкая рентабельность выполнения пассажирских перевозок во внутригосударственном сообщении. Имеются особенности управления персоналом при выполнении пассажирских перевозок в современных условиях [1]: высокий уровень сезонной неравномерности; внедрение ускоренных поездов с минимальным количеством остановок при выполнении маршрута движения; внедрение информационных технологий при обслуживании пассажиров на вокзалах; совершенствование технологии подготовки подвижного состава в рейс и его технического обслуживания; внедрение современной технологии технической эксплуатации подвижного состава и инфраструктуры. Эти особенности повлияли на эффективное использование персонала пассажирского хозяйства железной дороги.

Основная часть. В пассажирском хозяйстве выполняются следующие функции [2]:

- продажа проездных документов пассажирам по видам сообщений;
- маневровая работа с пассажирскими поездами и прицепными вагонами на пассажирских станциях;
- приём и отправление пассажирских поездов на пассажирских станциях;
- текущий ремонт зданий, сооружений, оборудования и инвентаря пассажирского хозяйства;
- обслуживание зданий, сооружений и оборудования пассажирского хозяйства;
- сопровождение багажных вагонов;
- капитальный ремонт основных средств пассажирского хозяйства;

- экипировка пассажирских вагонов;
- техническое обслуживание вагонов по программам ТО-1, ТО-2, ТО-3;
- текущий ремонт пассажирских вагонов;
- обслуживание вагонов проводниками в пассажирских поездах;
- деповской и капитальный ремонты пассажирских вагонов;
- ремонт пассажирских вагонов, находящихся на балансах других подразделений железных дорог.

Во всех видах функциональной деятельности железной дороги с пассажирскими вагонами и поездами используется персонал двух категорий: оперативный и административный.

В соответствии с выполняемыми функциями все работники пассажирского хозяйства разделены на следующие группы:

- работники вокзалов;
- проводники пассажирских вагонов;
- работники вагонных, пассажирских участков, дирекций по обслуживанию пассажиров с ремонтно-экипировочными депо;
- рабочие, занятые на ремонтах и техническом обслуживании пассажирских вагонов;
- рабочие, занятые на содержании зданий и сооружений пассажирского хозяйства.

Численность и структура персонала, связанного с обслуживанием пассажиров, зависит от качества прогнозирования структуры и объёма пассажирских перевозок. На основании прогноза формируется потребность в персонале транспортных организаций. Важное значение при этом оказывает точность прогнозирования. Для её повышения применяются эффективные методы прогнозирования спроса на пассажирские железнодорожные перевозки по видам сообщений [3]. Прогнозирование спроса – это полноценный бизнес-процесс, в ходе которого производится предварительная оценка и планирование спроса на транспортные услуги (перевозку и транспортную логистику), материалы и сервисы железнодорожной организации. Это позволяет сохранять максимальную рентабельность её работы и постоянную занятость персонала при различных условиях функционирования железной дороги. На железнодорожном транспорте рассматриваются экспертные и статистические методы прогнозирования

спроса на транспортные услуги по пассажирским перевозкам.

К методам прогнозирования отнесены:

– экспертный – прогноз составляется на базе субъективных экспертных оценок группы специалистов;

– статистический – спрос рассчитывается на основе продаж транспортных услуг пассажирам за предыдущий период;

– экстраполяционный – основан на продлении наблюдающейся тенденции (тренда) на нескольких важных предположениях выполнения пассажирских перевозок.

На железнодорожном транспорте практикуются несколько видов *экспертного метода*.

1 *Комиссия* – эксперты в составе комиссии коллегиально анализируют и составляют прогноз по транспортной деятельности. Каждый член комиссии высказывает собственное мнение по процентному результату эксплуатационного показателя.

2 *Интервьюирование* – разговор со специалистом выполняется по сложным аспектам прогноза.

3 *Анкетный опрос* – опрос эксперта или нескольких экспертов по анкетному запросу.

Высокую эффективность практического использования экспертного метода показал анкетный опрос.

Статистические методы предусматривают использование средневзвешенной величины – фактические продажи пассажирам транспортных услуг. Полученный результат ранжируется по их важности для пассажиров: международные, внутригосударственные, внутри-региональные, городские.

Экстраполяционные методы прогнозирования пассажирских перевозок основаны на положении, предусматривающем, что:

– будущее состояние пассажирских перевозок будет похожим на прошлое, при этом не произойдет никаких существенных изменений в расстановке сил на рынке предоставления пассажирам транспортных услуг;

– есть качественные ряды исходных данных достаточной глубины прогнозирования;

– профиль спроса на транспортные услуги пассажирам в будущем будет таким же, как и в прошлом периоде.

Существует несколько различных вариантов экстраполяционного метода:

- скользящей средней;
- экспоненциального сглаживания;
- экстраполяции тренда;
- нейросетевые модели.

В соответствии с методами прогнозирования пассажирских перевозок определяются структура и квалификационные требования к персоналу отрасли.

Численность контингента билетных кассиров на вокзалах регламентируется инструкцией «Нормативы численности кассиров билетных предприятий железнодорожного транспорта». Данная инструкция опирается на следующие измерители:

- количество проданных билетов;
- количество оформленных мест в поездах (плацкарты);
- трудоёмкость на оформление билета или плацкарты.

Расчёт среднесписочной численности билетных кассиров рассчитывается следующим образом:

– трудозатраты кассиров

$$(AT)_{\text{КС}} = N_j t_j^{\text{ТЗ}}, \quad (1)$$

где N_j – количество проданных билетов вида сообщения; $t_j^{\text{ТЗ}}$ – норматив трудозатрат билетного кассира на продажу одного билета по виду сообщения, ч;

– явочная численность кассиров

$$A_{\text{КС}} = k_{\text{ДП}} (AT)_{\text{КС}} / T_{\text{РВ}}; \quad (2)$$

при этом $k_{\text{ДП}} = 1,125$;

– списочная численность кассиров

$$A_{\text{КС}}^{\text{СП}} = A_{\text{ЯВ}} k_{\text{СН}}^{\text{КС}}, \quad (3)$$

где $k_{\text{СН}}^{\text{КС}}$ – коэффициент сезонной неравномерности по видам сообщения: международного – $k_{\text{СН}}^{\text{КС}} = 1,25$; межрегионального – $k_{\text{СН}}^{\text{КС}} = 1,16$; регионального – $k_{\text{СН}}^{\text{КС}} = 1,34$.

При сопоставимых размерах продаж проездных документов на различных железных дорогах имеется существенное различие среднесписочной численности билетных кассиров. Выполнено исследование динамики показателя на железных дорогах БЧ, УЗ, ДБ (рисунок 1).

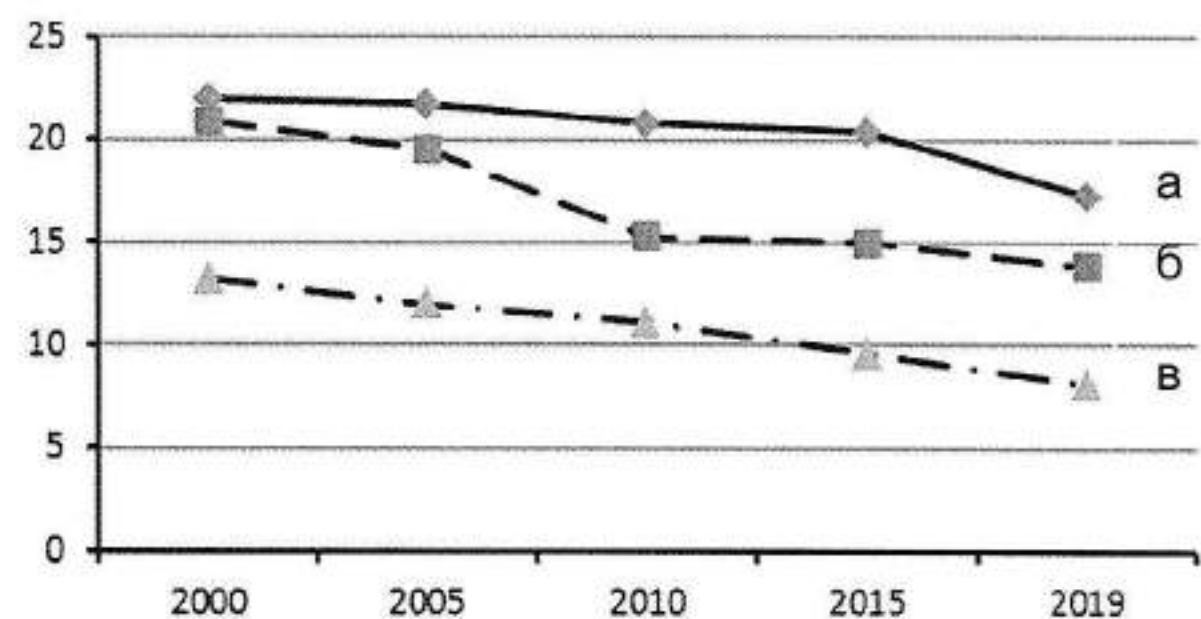


Рисунок 1 – Динамика доли списочной численности билетных кассиров в структуре персонала вокзалов, %: а – БЧ (Беларусь); б – РЖД (Россия); в – ДБ (Германия)

Из приведённых на рисунке 1 диаграмм видно, что идёт снижение структурной доли билетных кассиров в среднесписочной численности работников вокзалов на рассматриваемых железных дорогах. Это связано с тем, что с 2010 года начато активное внедрение продажи проездных документов через интернет. Вторым условием сокращения численности билетных кассиров стало изменение технологии организации работы с пассажирами при введении продажи сквозных билетов без их регистрации в пунктах пересадок. С изменением функциональных разграничений профессиональной деятельности билетных кассиров при продаже билетов по видам сообщений произошла смена структуры и объёма трудозатрат на оформление перевозочных документов для каждого пассажира. Это привело к сокращению количества билетных кассиров в целом по железным дорогам.

Ко второй группе работников пассажирского хозяйства относятся *проводники* пассажирских вагонов. Их численность напрямую связана с объёмами перевозок пассажиров по видам сообщений и технологией обслуживания вагонов. К массовым профессиям пассажирско-

го хозяйства относятся проводники пассажирских вагонов, численность которых зависит от размеров пассажирского движения по установленному расписанию, категории поездов и вагонов, а также в значительной степени от времени года (сезонности). На период массовых летних пассажирских перевозок количество проводников значительно увеличивается (в среднем на 60 %). Численность контингента проводников пассажирских вагонов регламентируется отраслевыми инструкциями «Нормативы обслуживания пассажирских поездов» и «Нормативы времени на подготовку, прием и сдачу пассажирских вагонов проводниками». В соответствии с данными инструкциями численность проводников пассажирских вагонов напрямую зависит от продолжительности нахождения вагона (поезда) в движении на маршруте в пунктах оборота и приписки. Согласно ей норматив явочного количества проводников подразделяется на три группы, определяемые в зависимости от продолжительности нахождения состава в рейсе: до 7 ч (один проводник на один вагон), от 7 до 18 ч (три проводника на два вагона), свыше 18 ч (в каждом вагоне должно быть два проводника). При этом все поезда делятся: по видам сообщения – международные, межрегиональные, региональные и городских линий; по уровню предоставляемого комфорта – бизнес- и экономкласса.

Укрупнённый расчёт среднесписочной численности проводников пассажирских вагонов выполняется следующим образом:

– трудозатраты

$$(AT)_{\text{пр}} = \eta_j^{\text{пв}} (nt)_j^{\text{пв}}, \quad (4)$$

где $\eta_j^{\text{пв}}$ – коэффициент увеличения затрат рабочего времени проводников пассажирских вагонов относительно вагоно-часов коммерческой их эксплуатации по виду сообщения; $(nt)_j^{\text{пв}}$ – вагоно-часы коммерческой эксплуатации пассажирских вагонов локомотивной тяги по виду сообщения;

– явочная численность проводников

$$A_{\text{пр}} = k_{\text{дп}} (AT)_{\text{пр}} / T_{\text{рв}}; \quad (5)$$

– списочная численность проводников

$$A_{\text{пр}}^{\text{сп}} = A_{\text{пр}} k_{\text{сн}}^{\text{пр}}. \quad (6)$$

За последние годы на железных дорогах при обслуживании международных и межрегиональных линий внедряются новые технологии перевозок пассажиров, предусматривающие использование моторвагонных поездов с высокоскоростными характеристиками. Это позволило существенно сократить потребность в проводниках пассажирских вагонов. С учётом перехода железных дорог на использование моторвагонной тяги в международном сообщении за последнее время возросло его использование в сообщении Минск – Москва, Минск – Вильнюс, наряду с сокращением количества ночных поездов.

Перераспределение подвижного состава при выполнении пассажирских перевозок нашло отражение в структуре служебного персонала. Потребность в проводниках сокращена в 2–3 раза на отдельных направлениях. Изменены также экономические показатели: моторвагонный подвижной состав используется более

интенсивно по сравнению с вагонами локомотивной тяги (на 60–70 %). По результатам исследований динамики численности проводников и внедрения моторвагонных поездов построены диаграммы (рисунок 2).

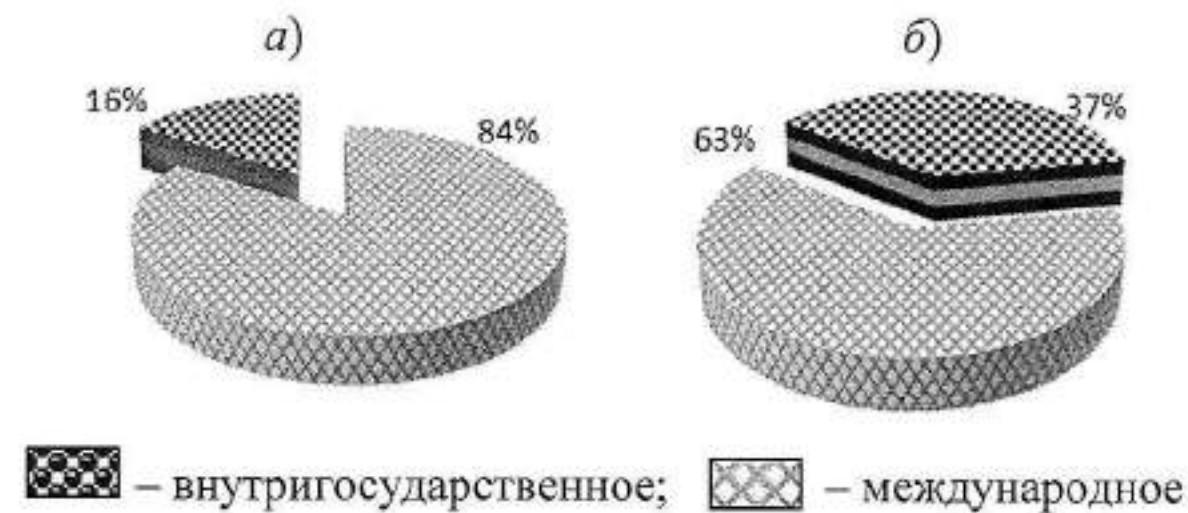


Рисунок 2 – Динамика структуры численности проводников по видам сообщений: а – 2000 г.; б – 2024 г.

При сравнении диаграмм, приведенных на рисунке 2, можно отметить, что численность проводников в международном сообщении сокращена на 21 %.

Контингент рабочих при выполнении экипировки пассажирских вагонов увязан с показателем «вагоно-километры пассажирских вагонов по видам сообщений». При этом следует отметить, что на многих железных дорогах экипировка пассажирских вагонов передана аутсорсинговым компаниям. Это позволяет сократить персонал административного сектора пассажирских дирекций, численность которого зависит от количества работников по функциональной деятельности.

Контингент рабочих, занятых техническим обслуживанием пассажирских вагонов, нормируется с учётом показателя «Количество выполненных технических обслуживания (ТО) вагонов в пунктах формирования и оборота».

Трудозатраты на выполнение ТО

$$(AT)_{\text{ТО}} = \sum_1^3 \iota_k^{\text{ТО}} \sum_1^2 ((ns)_j^{\text{пс}} / \lambda_k^{\text{ТО}}), \quad (7)$$

где $\iota_k^{\text{ТО}}$ – норматив затрат рабочего времени на проведение ТО пассажирских вагонов; $(ns)_j^{\text{пс}}$ – вагоно-километры коммерческой эксплуатации пассажирских вагонов локомотивной тяги; $\lambda_k^{\text{ТО}}$ – норматив пробега пассажирских вагонов между проведением ТО-1, ТО-2, ТО-3.

Явочная численность ремонтных рабочих пассажирского хозяйства при выполнении ТО

$$A_{\text{ТО}} = k_{\text{дп}}^{\text{ТО}} (AT)_{\text{ТО}} / T_{\text{рв}}. \quad (8)$$

Списочная численность работников

$$A_{\text{ТО}}^{\text{сп}} = A_{\text{ТО}} k_{\text{сн}}^{\text{ТО}}. \quad (9)$$

По результатам исследований при сопоставимых размерах пассажирских перевозок для разных железных дорог отмечается различная численность ремонтных рабочих в ТО в общей структуре их контингента. Установлены нормативы трудозатрат на выполнение ТО пассажирских вагонов, ч:

- ТО-1 в пунктах формирования и оборота – 0,21; в пути следования – 0,08;
- ТО-2 в пунктах формирования – 0,28;
- ТО-3 в пунктах формирования – 0,36.

Норматив пробега пассажирских вагонов между проведением технического обслуживания, км:

- ТО-1 в пунктах формирования и оборота – 34000; в пути следования – 6500;
- ТО-2 в пунктах формирования – 120000;
- ТО-3 в пунктах формирования – 246000.

Нормативы проведения ТО влияют на численность контингента ремонтных работников в структуре пассажирского хозяйства (рисунок 3).

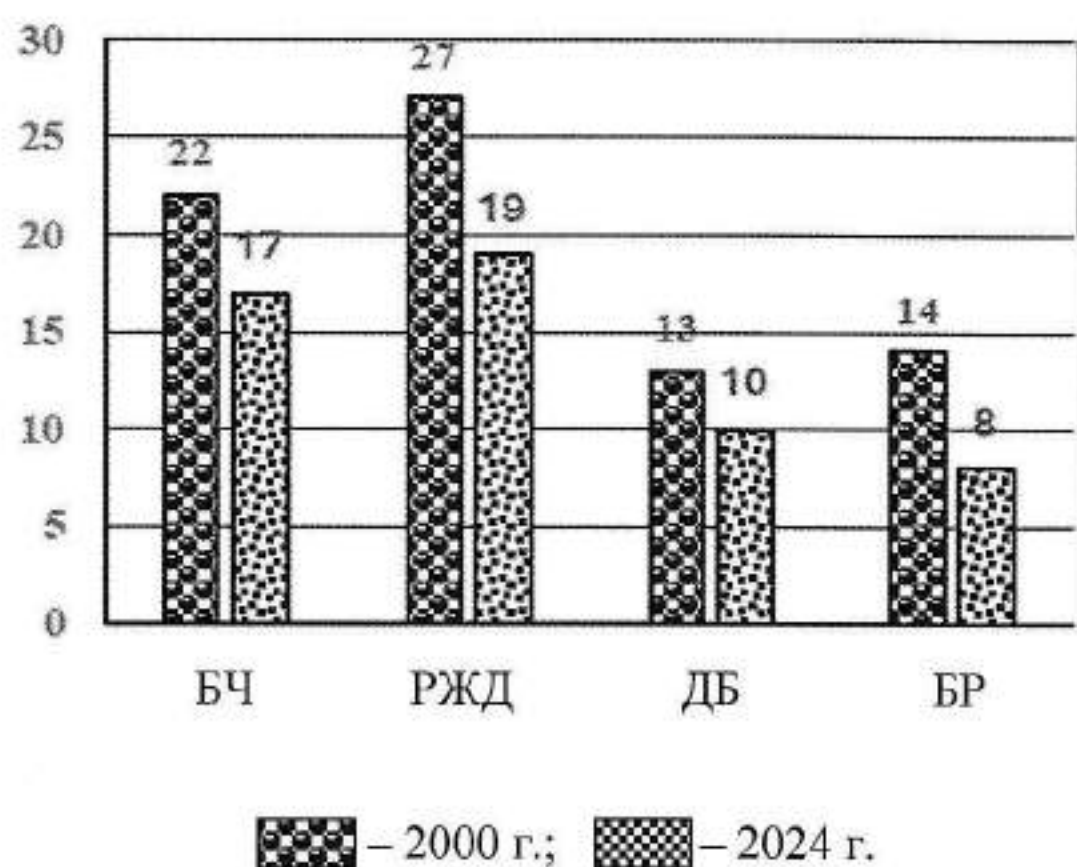


Рисунок 3 – Динамика численности ремонтных рабочих, выполняющих технологическое обслуживание пассажирских вагонов, %

Анализ приведённых на рисунке 3 диаграмм показывает, что численность рабочих, выполняющих техническое обслуживание пассажирских вагонов на железных дорогах Германии (ДБ) и Великобритании (БР) существенную разницу. Это связано с тем, что с 2000 г. в странах ЕС выполнена интеграция функциональных задач ТО-1, ТО-2, ТО-3 в единую задачу «Комплексное техническое обслуживание». Такая интеграция позволила сократить численность работников, выполняющих функции технической эксплуатации пассажирских вагонов на 35–40 %.

Расчёт списочной численности работников пассажирского хозяйства выполняется детально по всем профессиональным группам с учётом эксплуатационного показателя, характерного для каждой группы. Для Белорусской железной дороги характерным является сокращение персонала, связанного с численностью персонала пассажирской службы (таблица 1).

Таблица 1 – Динамика изменения списочной численности работников пассажирского хозяйства по производственным группам

Должность	В процентах	
	2000	2024
Работники вокзала	8,94	5,37
Проводники пассажирских вагонов	33,67	20,11
Рабочие, занятые на экипировке пассажирских вагонов	6,18	0,2
Рабочие, занятые на техническом обслуживании пассажирских вагонов	9,12	9,3
Рабочие, занятые на ремонте пассажирских участков	8,91	3,1
Рабочие, занятые на содержании зданий и сооружений пассажирского хозяйства	14,36	21,4
Другие виды профессиональных групп	18,82	40,52

Из таблицы 1 видно, что по основным профессиональным группам, связанным с обслуживанием вагонов, произошло сокращение персонала. При этом произошло увеличение персонала по другим профессиональным группам, связанным с обслуживанием моторвагонного подвижного состава (40,54 %).

Более 30 % численности контингента отраслевого хозяйства условно не зависит от объёмов перевозок, но при этом тесно с ними увязано.

При составлении бюджета трудовых ресурсов (план по труду) в организациях пассажирского хозяйства в современных условиях имеет место проблема планирования численности персонала по производственным группам. Это связано со следующими факторами: использование большого количества профессий, сложность расчётов численности персонала, большое количество и разнообразие структурных подразделений, ограниченные сроки составления бюджета. Учитывая, что более 57 % численности контингента пассажирского хозяйства напрямую зависит от объёмов перевозок, количества отправленных пассажиров и предоставления услуг, целесообразно в данном отраслевом хозяйстве при планировании контингента применять соответствующие отраслевые показатели эксплуатационной работы, которые влияют на содержание численности контингента.

Эксплуатационные показатели в секторе пассажирских перевозок, которые влияют на численность персонала:

- работники вокзалов – количество проданных билетов по видам сообщений и багажных отправок, напрямую связанное с персоналом, для которого установлены нормативы загрузки рабочего времени на единицу показателя;

- проводники пассажирских вагонов – вагоно-часы в движении, в пунктах приписки и оборота;

- работники дирекций по обслуживанию пассажиров: экипировка пассажирских вагонов – вагоно-километры пассажирских вагонов по видам сообщений;

- рабочие, занятые техническим обслуживанием пассажирских вагонов – количество ТО-1, ТО-2, ТО-3 в пунктах формирования и оборота вагонов в международном и внутригосударственном видах сообщения;

- рабочие, занятые на ремонтах пассажирских вагонов – количество КР-1 и КР-2 пассажирских вагонов;

- рабочие, занятые на содержании зданий и сооружений пассажирского хозяйства – количество перевезённых пассажиров.

Численность административного персонала установлена государственными нормативами в размере 5–7 % от общей численности персонала хозяйства перевозок. При этом используются:

- норматив трудозатрат персонала на исполнение единицы функциональных действий;

- фактические трудозатраты персонала, увязанные с объёмом выполненных действий;

- явочная численность работающих – количество персонала на рабочих местах;

– среднесписочная численность работающих – количество работников, установленная с учётом замещения;

– фонд оплаты труда с учётом отчислений на него – устанавливается с учётом установленных нормативов по должностным окладам;

– рассчитывается производительность персонала в трудозатратах и в денежном эквиваленте.

В современных условиях при усиливающейся конкуренции со стороны авиаперевозчиков и автотранспорта важными задачами пассажирского комплекса железных дорог являются освоение перевозок в полном объёме, привлечение дополнительных пассажиропотоков и укрепление позиций на транспортном рынке услуг для пассажиров. Одним из направлений решения этих вопросов является внедрение новых способов освоения железнодорожных пассажирских перевозок по видам сообщений на основе инновационного подвижного состава моторвагонного вида тяги. Освоение перевозок на региональных маршрутах с учётом специфики формирования спроса и уровней платёжеспособности населения в субъектах страны, позволит укрепить позиции железных дорог на транспортном рынке.

Ввод в обращение современных электропоездов в международном и межрегиональном видах сообщения требует обоснования области их безубыточной эксплуатации, определения направлений со стабильными пассажиропотоками на перспективу, внедрение на которых нового подвижного состава даёт гарантию получения высоких показателей использования вместимости и минимизацию рисков от невостребованности транспортных услуг. При этом следует учитывать социальную значимость внутриреспубликанского сообщения, которое дотируется из бюджета (по отдельным направлениям дотации составляют 70–80 %).

При активном внедрении моторвагонного подвижного состава в международном и межрегиональном сообщении изменены методические подходы к оценке экономической результативности пассажирских перевозок.

Анализ действующих методических подходов к оценке экономической эффективности эксплуатации поездов моторвагонной тяги на международных и межрегиональных видах сообщения показал необходимость их совершенствования с учётом новой структуры пассажиропотоков.

Обоснование способов освоения новых форматов пассажирских перевозок позволяет предоставлять транспортные услуги с учётом особенностей локальных рынков в стране и рационально использовать ресурсы пассажирского комплекса железной дороги и других видов транспорта (в частности, автомобильного).

В современной стратегии развития пассажирского хозяйства должны учитываться особенности управления персоналом при выполнении пассажирских перевозок в современных условиях. Доля железнодорожного транспорта в структуре объёмов перевозок и пассажирооборота в международном сообщении составляет 42,8 % (рисунок 4).

Согласно приведённой на рисунке 4 диаграмме наблюдается тенденция по выполнению пассажирских перевозок в международном сообщении в скоростных

электропоездах. Так, на направлении Минск – Москва перевозки выполняются в двух ночных и четырёх дневных (скоростных) поездах.



Рисунок 4 – Динамика структуры перевозок в международном сообщении, %

Во внутригосударственном сообщении тенденция перевода пассажирских перевозок от использования вагонов локомотивной тяги на электро- и дизельпоезда более активна (рисунок 5).



Рисунок 5 – Динамика структуры перевозок в межрегиональном сообщении, %

Согласно приведённой на рисунке 5 диаграмме наблюдается тенденция по выполнению пассажирских перевозок в межрегиональном сообщении в скоростных электропоездах. Так, на направлениях между Минском и областными центрами перевозки пассажиров выполняются в ночных и дневных (скоростных и ускоренных) поездах. Оставлены по одному ночному поезду из каждого областного центра с охватом всех населённых пунктов страны, имеющих выход на железнодорожную сеть. Между областными центрами и столицей назначены по три пары дневных поездов с использованием моторвагонной тяги. Одна пара поездов используется в экспрессном регламенте (между пунктами отправления и назначения поезд следует без промежуточных остановок с повышенной скоростью).

На постоянной основе осуществляется работа по увеличению размеров движения поездов в рамках программы «Дневной экспресс» и расширению географии курсирования пассажирских вагонов повышенной вместимости.

Организация пассажирских перевозок в современных условиях предполагает расширение транспортного обслуживания населения. Оно включает систему организационных мер и управленческих действий, цель которых – удовлетворение потребности в транспортной перевозке населения территории страны [4].

В современной транспортной инфраструктуре появляются новые инфокоммуникационные и транспортные технологии, способствующие развитию трансформации существующих режимов и автоматизации функций обработки данных пассажиров.

Функции по обслуживанию пассажиров существенно изменяются [6]. При этом обычные услуги общественного транспорта по-прежнему остаются для перевозки больших объёмов пассажиров, однако они становятся более автоматизированными и автономными.

При реализации задач организации перевозок пассажиров определяются оптимальные решения, которые включают:

- рациональные маршруты перевозок, при необходимости перенаправляют или отменяют малорентабельные маршруты;

- подходящий вид транспортных средств;

- количество единиц транспорта;

- расписание и интервалы отправки транспортных средств на выбранном маршруте;

- порядок организации обслуживания пассажиров.

Экономические проблемы пассажирских перевозок связаны с неравномерностью их выполнения, что имеет значение для небольшого железнодорожного полигона Беларуси. При этом чем выше неравномерность пассажирских перевозок, тем больше должны быть резервы пассажирского транспорта. Это увеличивает необходимые капиталовложения и независящие эксплуатационные расходы от размеров движения поездов, а также является одним из факторов низкой экономической эффективности и даже убыточности пассажирских перевозок [5].

На современном этапе железными дорогами постоянно проводится работа по повышению качества обслуживания пассажиров в пути следования [6]. Для Беларуси решением этой проблемы является формирование поездов бизнес-класса, отвечающих современным требованиям комфорта и надёжности. В этих поездах пассажирам предоставляется возможность быстрой доставки в удобное время. За последние годы проведена работа по совершенствованию графика движения и повышению маршрутных скоростей. Для этого разработаны мероприятия по сокращению времени нахождения в пути следования с увеличением маршрутных скоростей до 140–160 км/ч.

В условиях рыночной экономики и высокой конкуренции пассажирских перевозок предприятия железнодорожного транспорта постоянно формируют системы эксплуатационных показателей приобретает особую актуальность [7]. При оценке уровня качества транспортного обслуживания пассажиров определяется измеритель их соответствия нормативным условиям.

Система оценки качества решения железнодорожным предприятием возникающих проблем позволяет занять более высокие позиции в рыночной системе транспортного обслуживания населения. Система показателей качества транспортного обслуживания является необходимым условием качественного обслуживания пассажиров железнодорожного транспорта. Выполнение этого условия обеспечит максимально полную степень удовлетворения потребностей населения

в пассажирских перевозках и позволит предприятиям железнодорожного транспорта обеспечить безопасности пассажиров во время перевозок. Наряду с предоставлением пассажирам услуг высокого качества, предприятия железнодорожного транспорта обеспечивают бесперебойность процессов организации, планирования и контроля.

Отзывы пассажиров, не удовлетворённых качеством сервиса железнодорожных перевозок составляют около 24 %.

- плохое качество связи во время поездки, отсутствие интернета;

- продолжительность поездок в международном сообщении по сравнению с авиационным транспортом из-за специфики логистических возможностей железной дороги, графиков движения поездов и низкой средней скорости передвижения;

- необходимость брать с собой предметы обихода, досуга, гигиены, питания;

- неудобство проведения гигиенических процедур в продолжительных поездках;

- неудобные места размещения плакатных мест;

- шум от движения состава, вибрация, специфический запах железной дороги;

- отсутствие кондиционеров в большинстве вагонов и повышенная жара в летний период.

Для оценки затрат на персонал разработаны методические особенности формирования расходных ставок для пассажирского движения [8]. На современном этапе при их формировании рассматривается организация пассажирских мультимодальных перевозок в современных условиях [9]. При этом разрабатывается модель системы мультимодального выполнения пассажирских перевозок в международном и внутригосударственном сообщении. В международном сообщении рассматривается включение железнодорожных коммуникаций в систему авиaperезовок (Минск – Варшава / Вильнюс – аэропорты). Разрабатывается новая нормативная база, включающая стратегию цифровой трансформации мультимодальной логистики пассажирских перевозок. Перевозка пассажиров и багажа предусматривает взаимодействие нескольких видов транспорта. Применение мультимодальных перевозок пассажиров позволяет пассажирам перемещаться при оптимальном выборе вида транспорта в зависимости от расстояния, времени и условий перевозки.

Выбор мультимодальной перевозки определяется критериями: выбор эффективного маршрута с учётом затрачиваемого времени в пути и стоимости перевозки; объединение нескольких видов транспорта с удобным переходом пассажиров с одного вида транспорта на другой при минимизации продолжительности поездки; наличие единого билета.

Положительные стороны мультимодальных перевозок: один транспортный оператор; используется взаимодействие нескольких видов транспорта; снижение стоимости перевозки; отсутствие ограничений перевозки в районы; в которых отсутствует железнодорожная сеть.

Недостатки мультимодальных перевозок: сложная система перевозок, внутритранспортный эгоизм;

согласованность расписания нескольких видов транспорта, пересадки между различными видами транспорта могут превышать запланированное время, что увеличит общее время нахождения в пути; возможна потеря багажа при пересадке с одного вида транспорта на другой; в случае задержки или отмены одного из рейсов происходит нарушение исполнения всего маршрута.

При организации мультимодальных перевозок пассажиров в Беларуси сформированы маршруты постоянного обращения транспортных средств. Они показали высокую эффективность и привлекательность для пассажиров.

Стратегическое развитие мультимодальных пассажирских перевозок в Беларуси позволит обеспечить географическую связанность отдаленных участков страны и усовершенствовать транспортную доступность населения.

Разработана новая методологическая основа для проведения разработки мультимодальных перевозок пассажиров. Она предусматривает наличие единого транспортного документа, который должен регламентировать перевозку пассажиров на любом из видов транспорта, включённых в мультимодальную перевозку, без переоформления документа на каждый из них. Данный документ формируется на основе общей цифровой платформы и представляет собой основу системы взаиморасчетов между участниками платформы.

Организация мультимодальных перевозок пассажиров предполагают следующие риски: от создания цифровой платформы до конечного пункта назначения пассажира оператору стоит учитывать риски и потери на всём пути организации перевозок. Покупая единый билет, пассажир должен получить всю информацию по организации работы всех элементов маршрута: наличие информации о необходимости и возможности нового бронирования или смены тарифа при отмене поездки или переносе дат; должна обеспечиваться быстрая реакция предоставления пассажиру новых билетов или возврата денежных средств.

Заключение. В новых условиях организации пассажирских перевозок сформировались особенности управления персоналом, которые ранее не рассматривались.

1 Произошло техническое перевооружение подвижного состава и технологии выполнения пассажирских перевозок по видам сообщения:

– внедрение креативного моторвагонного подвижного состава при выполнении перевозок пассажиров в международном сообщении;

– ускорение движения поездов за счёт скорости (160 км/ч) и сокращения количества промежуточных остановок;

– внедрение экспрессного движения поездов между областными центрами и столицей.

2 Внедрение новых технологий организации пассажирских перевозок привело к сокращению количества обслуживающего их персонала.

3 Выявлены отклонения численности персонала по рабочим категориям и группам в зависимости от функциональной загрузки. На его основе определена потребность уровня обеспечения транспортных предприятий необходимыми кадрами по рабочим группам.

4 Имеет место опережающий рост численности административного персонала в пассажирском секторе эксплуатационной работы железных дорог. Он создает условия для снижения эффективности использования трудовых ресурсов по критерию производительности труда.

Список литературы

1 **Лиманчук, Л. Н.** Общая характеристика транспортного обслуживания в пассажирских железнодорожных перевозках / Л. Н. Лиманчук, М. А. Василенко, В. А. Рахаев // Современные вызовы транспортной отрасли: новые возможности : сб. науч. тр. – М. : РУДН, 2023. – С. 273–277.

2 Организационные основы пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте / В. А. Рахаев, М. А. Василенко, М. А. Кузина, Е. А. Василенко // Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки : сб. науч. тр. – М. : Перо, 2023. – С. 288–290.

3 **Венедиктов, Г. Л.** Эффективные методы прогнозирования спроса на пассажирские железнодорожные перевозки / Г. Л. Венедиктов, В. М. Кочетков // Экономика железных дорог. – 2016. – № 6. – С. 36–45.

4 **Тащилина, А. Д.** Организация пассажирских перевозок в современных условиях / А. Д. Тащилина // Человек. Знак. Техника : сб. ст. I Междисциплинарного молодежного форума с междунар. участием. – 2021. – С. 179–185.

5 **Сондырева, А. Ю.** Совершенствование организации железнодорожных пассажирских перевозок в современных условиях / А. Ю. Сондырева, Д. В. Ушаков. // Транспорт: проблемы, цели, перспективы (transport 2021) : сб. материалов II Всерос. науч.-техн. конф. – Пермь, 2021. – С. 651–654.

6 **Выскребенцев, И. С.** Качество транспортного обслуживания при организации пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте / И. С. Выскребенцев // Экономика и менеджмент систем управления. – 2019. – № 1 (31). – С. 13–20.

7 **Бердышева, Ю. А.** К вопросу оценки качества пассажирских перевозок на железной дороге / Ю. А. Бердышева, Е. А. Жаркова // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 2 (8). – С. 5–9.

8 **Морозова, М. В.** Методические особенности формирования расходных ставок для пассажирского движения ОАО «РЖД» / М. В. Морозова // Железная дорога: путь в будущее : сб. материалов I Междунар. науч.-техн. конф. – М., 2022. – С. 375–379.

9 **Болът, А. С.** Организация пассажирских мультимодальных перевозок в современных условиях / А. С. Болът, П. С. Болът, А. В. Власова // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2024. – № 11. – С. 3–11.

Получено 28.08.2025

A. A. Mikhalchenka. Features of staff management in performing passenger transportation in modern conditions.

The results of the research of the personnel management system of railway divisions in performing passenger transportation are presented. The methodological principles of calculating the number of personnel of railway passenger economy divisions in the new conditions of transport operation depending on the functional load on them are considered. Options for organizing service and administrative personnel in performing passenger transportation are considered. The dynamics of personnel change is assessed depending on the volume of transportation, the structure of passenger traffic, the provision of services, the implementation of technical regulations with rolling stock and infrastructure.

УДК 656.21:711.7

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

ТИПОЛОГИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ПЛАНИРОВОЧНЫХ МОДЕЛЕЙ РАЗМЕЩЕНИЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА В АГЛОМЕРАЦИИ

Рассмотрены пространственно-планировочные модели размещения инфраструктуры железнодорожного транспорта, которые во многом определяют характер развития агломерации. Показано, что различия между городом-ядром и городами-спутниками отражают функциональную специализацию территорий и требуют дифференцированного подхода к планированию. Учет этих различий позволяет использовать инфраструктуру железнодорожного транспорта не только как средство перевозки пассажиров, но и как инструмент формирования устойчивой, сбалансированной и пространственно связанной агломерации.

Введение. Современные концепции транспортного планирования трактуют пассажирскую железнодорожную станцию не только как пункт посадки и высадки пассажиров, но и как многофункциональный центр городской активности, в котором вокзалы и станции крупнейших городов мира становятся ядром многоуровневых комплексов, включающих торговые площади, офисные здания, гостиницы, парковки и культурные пространства [1, 4]. Такое размещение способствует концентрации деловой активности и формирует новые «точки роста» в городской структуре. При этом интеграция пассажирской железнодорожной станции в городскую среду также означает рациональное использование ограниченных территориальных ресурсов [1].

Для Республики Беларусь данный подход имеет особую актуальность. В Минске, Бресте, Гомеле и Гродно центральные железнодорожные вокзалы уже являются значимыми градоформирующими объектами. Однако дальнейшее развитие агломераций требует их более тесной интеграции с городской средой: создания мультимодальных пересадочных узлов, расширения сервисных функций вокзалов, реконструкции прилегающих территорий с учётом потребностей пешеходов, велосипедистов и пассажиров общественного транспорта [3]. В связи с этим железнодорожная станция в центре агломерации должна рассматриваться не только как транспортный объект, но и как элемент комплексного развития городской среды, способный повысить привлекательность общественного транспорта, сократить нагрузку на автомобильные дороги и сформировать новые зоны деловой и социальной активности [2].

Постановка задачи. Формирование многоуровневых станционных комплексов с размещением пешеходных галерей, платформ, пересадочных коридоров, парковочных пространств и общественных функций позволяет создавать комбинативные образования транспортного обслуживания. Такие комплексы интегрируют железнодорожную инфраструктуру с объектами торговли, офисной недвижимости, гостиницами и жилыми зданиями, превращая вокзальные территории в многофункциональные городские кластеры. Подобный подход способствует более равномерному распределению пассажирских потоков во времени и пространстве и повышает экономическую отдачу от использования транспортной инфраструктуры.

Таким образом, инфраструктура железнодорожного транспорта в системе «город-ядро – город-спутник» представляет собой сложный иерархический комплекс, функционирование которого определяется взаимосвязанным развитием путевого хозяйства, станционных устройств и организационно-технологических решений. Эффективность этой инфраструктуры зависит от степени её интеграции в общую транспортную и градостроительную структуру агломерации, а также от способности адаптироваться к изменяющимся условиям расселения и мобильности населения. Именно в этом контексте дальнейший анализ путевого развития, станционных узлов и функциональной роли железнодорожных объектов в городах-ядрах и городах-спутниках приобретает особую научную и практическую значимость, что является актуальным направлением исследования.

Основная часть. Сегодня железнодорожная станция и вокзал представляют собой не просто функциональный узел пересадок, а сложный морфологический компонент, оказывающий системное влияние на организацию городской среды. Его роль значительно выходит за рамки транспортной логистики: вокзал становится пространственным стабилизатором, вокруг которого выстраиваются планировочные оси, пешеходные маршруты, транспортные артерии и общественные пространства. Такая структурообразующая функция объясняется спецификой железнодорожной инфраструктуры: выраженной линейностью трасс, протяжённостью путей и необходимостью учитывать рельеф и градостроительные ограничения. В отличие от других транспортных объектов, которые могут быть перемещены или заменены без радикального изменения городской структуры железнодорожная станция и вокзал имеют высокую степень фиксированности, что превращает их в устойчивую точку городской морфологии.

Линейность железнодорожных путей задаёт направление движения не только поезда, но и городской застройки. Железнодорожная станция и вокзал становятся своеобразным центром пересечения потоков, потому что пути формируют чёткие пространственные оси, которые пронизывают городскую структуру и продолжают в магистралях, проспектах, бульварах и ключевых пешеходных связях. В результате железнодорожная станция и вокзал неизбежно становятся

элементом, который «притягивает» к себе важнейшие маршруты городской жизни и формируют вокруг себя плотный узел транспортной и социальной активности. Даже если город растёт и меняет функциональные приоритеты, вокзал сохраняет способность направлять потоки движения благодаря своей роли в региональной и межгородской коммуникации (таблица 1).

Таблица 1 – Основные элементы инфраструктуры железнодорожного транспорта города для обслуживания пассажиров

Элемент инфраструктуры	Функциональное назначение	Краткая характеристика
Пассажирские железнодорожные станции	Обслуживание пассажиропотоков	Узлы городской мобильности
Вокзалы	Пересадка, сервис, общественные функции	Центры образования и погашения пассажиропотоков в городе (зоны тяготения)
Пассажирские технические станции (пассажирские участки)	Обслуживание пассажирского подвижного состава	

Пассажирские железнодорожные станции в агломерационной системе не являются однородными элементами. Их функциональное назначение варьируется в зависимости от положения в иерархии расселения и характера обслуживаемых потоков. В городах-ядрах можно выделить центральные вокзалы, распределительные пассажирские станции, грузовые и сортировочные узлы, а также специализированные технические станции. В городах-спутниках чаще всего присутствует одна железнодорожная станция, совмещающая пассажирские и минимальные грузовые функции (таблица 2).

Таблица 2 – Типология инфраструктуры железнодорожного транспорта для города

Тип станции	Основные функции	Преобладающий город
Пассажирская (центральный вокзал)	Дальние, региональные перевозки	Город-ядро
Пассажирская (пригородный вокзал)	Региональные (пригородные) перевозки	Город-ядро
Сортировочная (грузовая)	Грузовая работа	Город-ядро
Участковая	Пассажирские и грузовые перевозки	Город-спутник
Остановочный пункт	Внутренние (маятниковые) перевозки	Город-спутник

Инфраструктура железнодорожного транспорта является одним из ключевых факторов пространственно-экономического развития агломераций, оказывая как прямое, так и опосредованное воздействие на хозяйственную деятельность, рынок труда и инвестиционную привлекательность территорий. В условиях формирования полицентричных агломераций роль железной дороги выходит за рамки транспортного обеспечения, превращаясь в системный элемент экономической интеграции города-ядра и города-спутника [4].

В городе-ядре железнодорожная инфраструктура обеспечивает устойчивое функционирование крупных рынков труда, логистических узлов, промышленных зон и деловых центров. Высокая пропускная способность и связность железнодорожной сети позволяют концентрировать экономическую активность, снижая барьеры пространственной доступности и обеспечивая приток трудовых и потребительских ресурсов. В этом контексте железная дорога выступает фактором масштабирования городской экономики, расширяя фактические границы рынка труда и сферы обслуживания (рисунок 1).

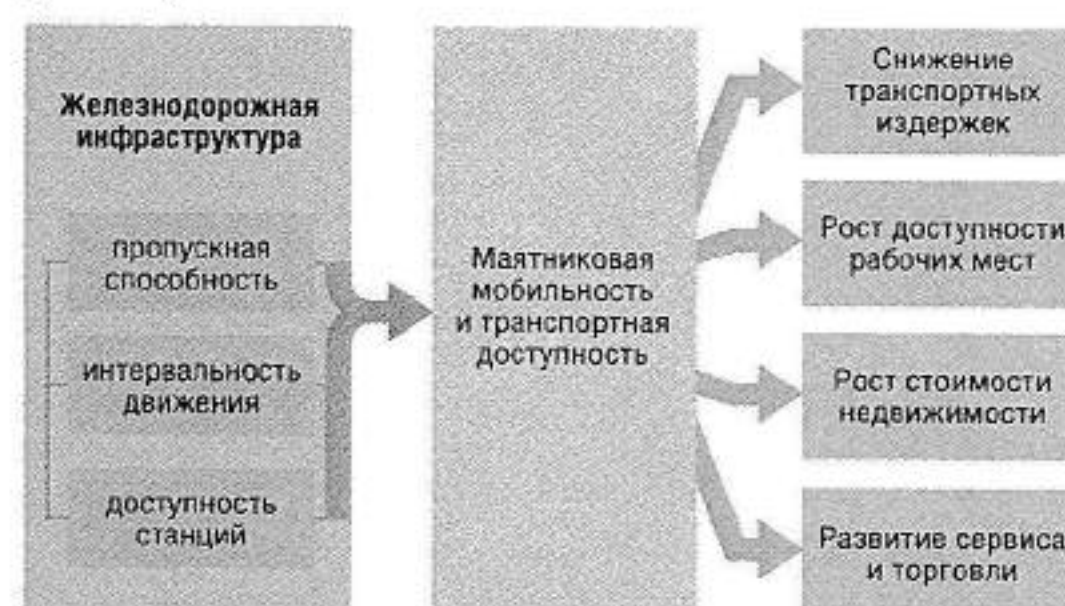


Рисунок 1 – Экономические каналы влияния железнодорожной инфраструктуры

Для города-спутника значение железнодорожной инфраструктуры зачастую является определяющим. В ряде случаев именно наличие железнодорожного сообщения превращает населённый пункт из локальной жилой территории в элемент агломерационной экономики. Железная дорога обеспечивает включение города-спутника в экономические цепочки города-ядра, формируя условия для маятниковой мобильности, притока инвестиций и развития локального бизнеса. Отсутствие или деградация железнодорожной инфраструктуры, напротив, ведёт к экономической изоляции, снижению инвестиционной активности и росту зависимости от индивидуального автотранспорта. Экономический эффект железнодорожной инфраструктуры проявляется через несколько взаимосвязанных механизмов, каждый из которых может быть формализован и количественно оценён. При том экономический эффект инфраструктуры проявляется через снижение транспортных издержек, рост доступности рабочих мест, повышение стоимости недвижимости в зоне тяготения станции, развитие сервисных и торговых функций территорий вблизи станций [2].

Первичным и наиболее очевидным эффектом развития железнодорожной инфраструктуры является снижение совокупных транспортных издержек для населения и бизнеса. Эти издержки включают как прямые денежные расходы, так и временные затраты, связанные с перемещением работников, товаров и услуг.

Железнодорожная инфраструктура расширяет фактический радиус доступности рынка труда, особенно для жителей городов-спутников. Количество доступных рабочих мест возрастает не за счёт их физического создания на территории спутника, а за счёт включения города в транспортную доступность ядра. Тогда индекс доступности рабочих мест может быть представлен в следующем виде:

$$I_{\text{рм}} = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{T_i}, \quad (1)$$

где R_i – количество рабочих мест в зоне i ; T_i – среднее время поездки до зоны i .

Сокращение времени поездки T_i вследствие улучшения железнодорожного сообщения приводит к росту $I_{\text{рм}}$, что повышает экономическую привлекательность проживания в городе-спутнике. В долгосрочной перспективе это способствует выравниванию уровня доходов и снижению территориального социально-экономического неравенства внутри агломерации.

Одним из наиболее наглядных эффектов железнодорожной инфраструктуры является рост стоимости земельных участков и объектов недвижимости в зоне пешеходной и транспортной доступности станций. Данный эффект обусловлен сочетанием транспортной доступности, концентрации сервисных функций и снижением издержек ежедневной мобильности.

Экономический эффект капитализации инфраструктуры может быть выражен через коэффициент прироста стоимости недвижимости

$$K_{\text{нед}} = \frac{P_{\text{ст}}}{P_{\text{баз}}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{ст}}$, $P_{\text{баз}}$ – средняя стоимость недвижимости в зоне влияния и за пределами зоны влияния станции.

Как правило, $K_{\text{нед}} > 1$, причём его величина зависит от уровня сервиса станции, интервальности движения и интеграции с городским транспортом. В городах-спутниках данный эффект зачастую играет ключевую роль в формировании локального рынка недвижимости и стимулирует девелоперскую активность.

Железнодорожные станции выступают точками концентрации потоков, что создаёт предпосылки для развития торговли, общественного питания, бытовых и деловых услуг. Экономическая активность объектов вблизи станций формируется не только за счёт жителей прилегающих районов, но и за счёт транзитных пассажиров. Интенсивность сервисной активности можно представить через показатель плотности экономических функций:

$$I_{\text{серв}} = \frac{N_c}{S_3}, \quad (3)$$

где N_c – количество сервисных и торговых объектов; S_3 – площадь зоны тяготения станции.

Таким образом, железнодорожная станция – основной транспортный и функциональный центр города (рисунок 2).

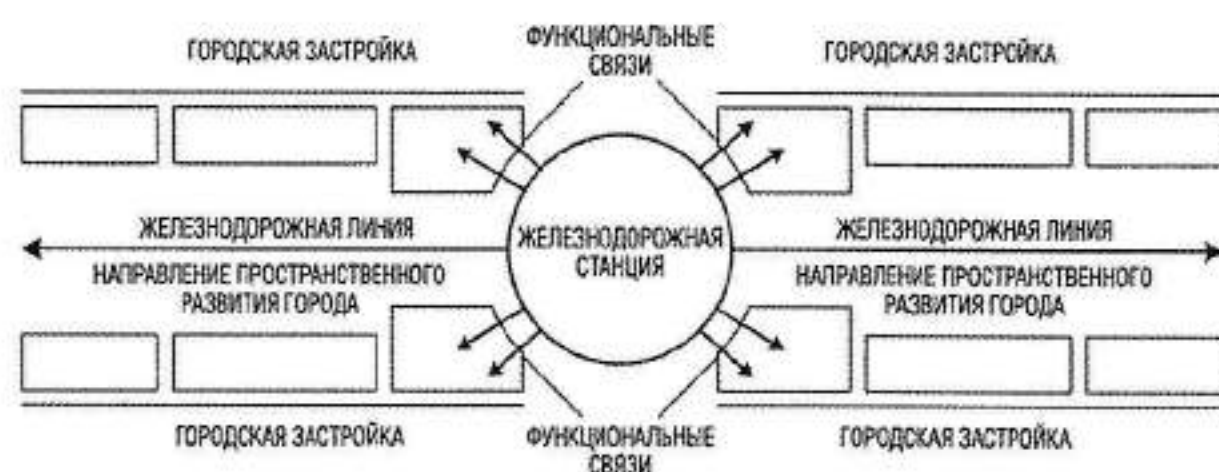


Рисунок 2 – Железнодорожная станция как основной транспортный и функциональный центр города

Рост $I_{\text{серв}}$ свидетельствует о трансформации станции из чисто транспортного объекта в многофункциональный экономический узел, усиливающий агломерационный эффект железнодорожной инфраструктуры.

Приоритетные направления эффективности развития железнодорожной инфраструктуры в городе-центре и его спутнике приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Приоритетные направления эффективности развития инфраструктуры железнодорожного транспорта в городе-центре и его спутнике

Направления развития	Город-ядро	Город-спутник
Рынок труда	Расширение агломерации	Доступ к рабочим местам
Логистика перевозок	Крупные хабы	Подвоз и распределение
Рынок недвижимости	Дифференциация цен	Рост привлекательности
Инвестиционная политика	Приток капитала	Стимул развития

Одной из важнейших проблем агломерационного развития является инфраструктурная асимметрия между городом-ядром и городами-спутниками (рисунок 3).

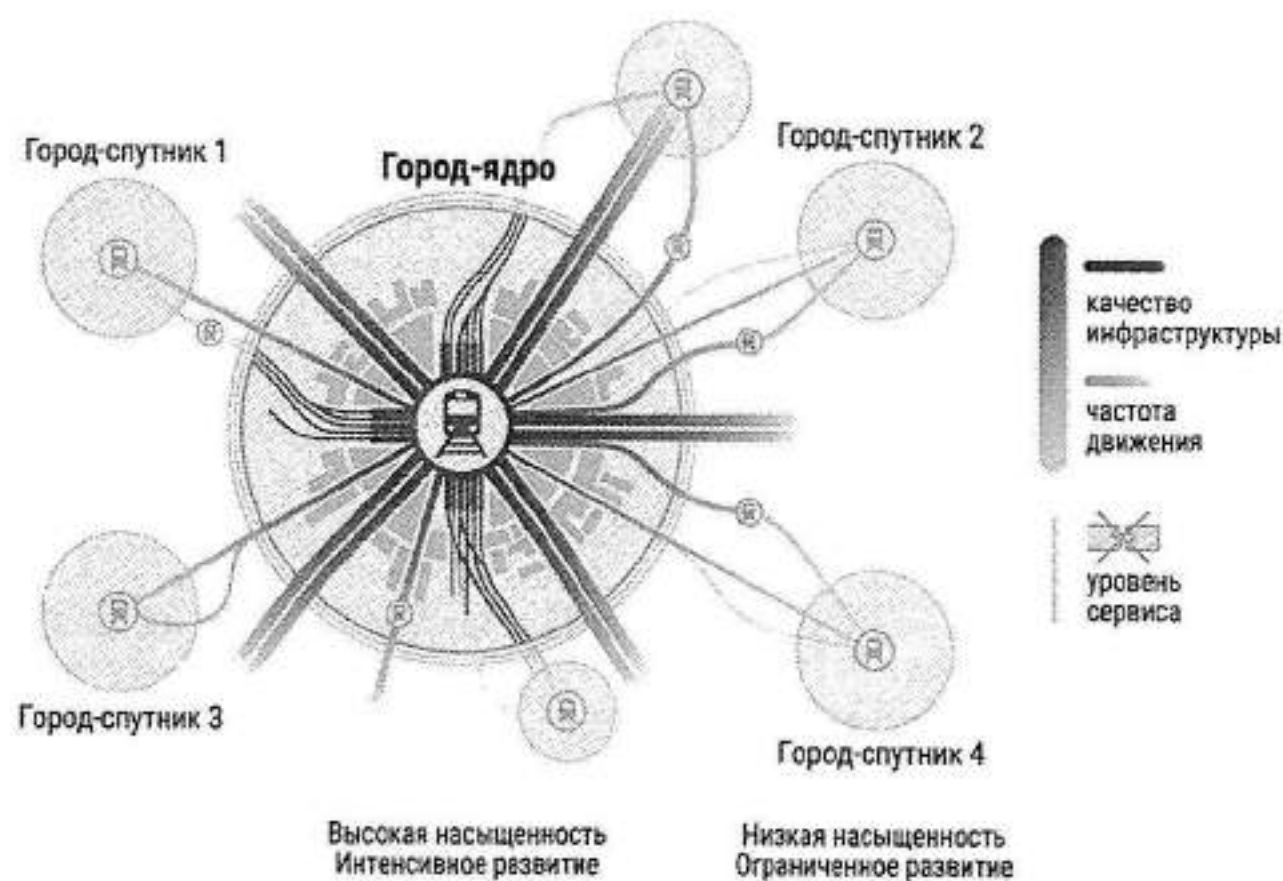


Рисунок 3 – Инфраструктурная асимметрия агломерации

Под инфраструктурной асимметрией в данном контексте понимается систематическое неравенство в уровне развития транспортных, сервисных и пересадочных элементов железнодорожной инфраструктуры, выражающееся в различиях качества вокзалов, частоты и регулярности движения поездов, уровне пассажирского сервиса, а также степени интеграции с другими видами городского транспорта. В городе-ядре железнодорожная инфраструктура, как правило, развивается приоритетно: здесь концентрируются крупные вокзальные комплексы, осуществляется обслуживание подвижного состава, внедряются современные системы навигации, сервиса и пересадки. Такое развитие объективно обусловлено масштабами пассажиропотоков, административным статусом и экономической значимостью города-ядра. Однако при отсутствии сбалансированной агломерационной политики данная концентрация инвестиций формирует диспропорции, влияющие на пространственную структуру мобильности и социально-экономические связи внутри агломерации.

Инфраструктурная асимметрия проявляется прежде всего в параметрах доступности. Для города-ядра характерны минимальные интервалы движения, высокая плотность железнодорожных узлов и развитая мультимодальная интеграция (рисунок 4).

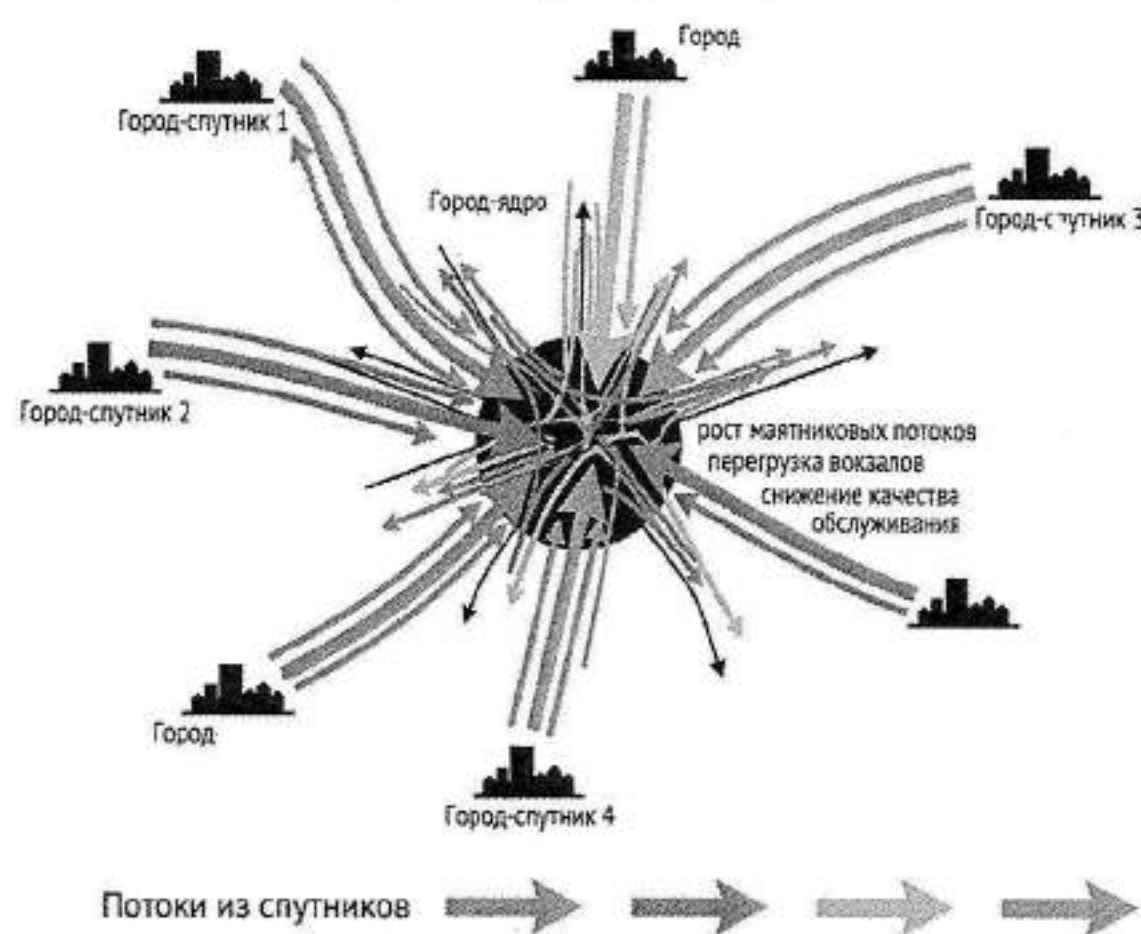


Рисунок 4 – Город-ядро как доминирующий центр притяжения в агломерации

В городах-спутниках, напротив, часто наблюдаются устаревшие вокзалы, малодеятельные направления движения поездов, слабая связность с местным общественным транспортом и ограниченный набор сервисных функций. В результате транспортная система агломерации формируется как иерархически неравновесная, где город-ядро выступает доминирующим центром притяжения. При этом чрезмерная концентрация инфраструктурных инвестиций в городе-ядре усиливает миграционные потоки.

Повышение качества обслуживания и сокращение времени в пути делает город-ядро ещё более привлекательным как место приложения труда, потребления и получения услуг. В то же время недостаточное развитие инфраструктуры в городах-спутниках усиливает социально-экономическую зависимость и ограничивает их самостоятельное развитие [2, 5]. Для формализации данного эффекта целесообразно введение коэффициента инфраструктурной асимметрии

$$K_{ac} = \frac{I_{инф}^{яд}}{I_{инф}^{сп}}, \quad (4)$$

где $I_{инф}^{яд}$, $I_{инф}^{сп}$ – интегральный индекс качества железнодорожной инфраструктуры города-ядра и города-спутника соответственно.

При $K_{ac} > 1$ наблюдается выраженная асимметрия, усиливающая центростремительные потоки. Чем выше значение коэффициента, тем более односторонним становится характер агломерационных связей. Следует отметить, что рост пассажиропотоков приводит к перегрузке вокзалов и пересадочных узлов города-ядра. Даже при высокой пропускной способности инфраструктуры эффект накопления пассажиров в часы пик снижает надёжность и комфорт перевозок.

Таким образом, инфраструктурная асимметрия парадоксальным образом снижает эффективность даже хорошо развитых центральных объектов. Степень пе-

регрузки центрального узла может быть оценена через коэффициент загрузки

$$K_{заг} = \frac{П_{ф}}{П_{пр}}, \quad (5)$$

где $П_{ф}$ – фактический пассажиропоток через узел; $П_{пр}$ – проектная пропускная способность узла.

При $K_{заг} \geq 1$ возникают системные сбои, растёт время ожидания и ухудшается качество обслуживания. В условиях асимметричного развития рост $П_{ф}$ обусловлен не только общим увеличением мобильности, но и дефицитом альтернативных центров притяжения в городах-спутниках.

Недостаточное развитие железнодорожной инфраструктуры в городах-спутниках усиливает их социально-экономическую зависимость от города-ядра. При слабой транспортной связности и низком уровне сервиса города-спутники теряют потенциал формирования собственных рынков труда и локальных центров деловой активности. Это приводит к «спальному» типу развития, при котором территория выполняет преимущественно функцию проживания, а экономическая активность концентрируется вне её пределов. Данный эффект может быть выражен через индекс экономической автономности города-спутника:

$$I_{авт} = \frac{P_{лок}}{P_{общ}}, \quad (6)$$

где $P_{лок}$ – количество рабочих мест, доступных внутри города-спутника; $P_{общ}$ – суммарное количество рабочих мест, используемых жителями города-спутника (включая поездки в ядро).

Снижение $I_{авт}$ свидетельствует о росте зависимости от центра и усилении маятниковой мобильности, обусловленной инфраструктурной асимметрией.

Развитие железнодорожной инфраструктуры оказывает влияние на социальную структуру городов. В городах-спутниках улучшение транспортной доступности часто приводит к росту доли экономически активного населения, формированию «спальных» районов и изменению демографического профиля. В городе-ядре железнодорожная инфраструктура способствует социальной дифференциации районов: привокзальные территории могут одновременно выступать зонами высокой деловой активности и социального контраста (таблица 4).

Таблица 4 – Социальные эффекты развития инфраструктуры города-центра и его спутника

Показатель	Город-ядро	Город-спутник
Маятниковая миграция	Прием потоков	Генерация потоков
Демография	Многообразие групп	Омоложение населения
Социальная мобильность	Высокая	Зависимая
Городская идентичность	Многоуровневая	Транспортно-ориентированная

Город-ядро характеризуется высокой плотностью железнодорожной инфраструктуры и многофункциональ-

ностью её элементов. Вокзалы в таких городах, как правило, являются крупными транспортно-пересадочными узлами, интегрированными с метро, автобусными и трамвайными сетями. При этом железнодорожные станции города-ядра выполняют сразу несколько функций, среди которых обслуживание дальних и региональных пассажирских перевозок; перераспределение пригородных потоков; обеспечение грузовых операций в рамках агломерации.

В таблице 5 приведена краткая характеристика инфраструктуры железнодорожного транспорта города-ядра.

Таблица 5 – Краткая характеристика инфраструктуры железнодорожного транспорта города-ядра

Классификационный признак	Краткая характеристика
Тип узла	Многофункциональный
Плотность путей	Высокая
Доля транзитных поездов	Значительная
Интеграция с городским транспортом	Максимальная
Градостроительная функция	Формирование центров развития

Инфраструктура города-ядра часто выступает драйвером реорганизации прилегающих территорий, включая редевелопмент промышленных зон и создание новых общественных пространств.

В отличие от города-ядра его спутники, как правило, обладают более компактной и специализированной железнодорожной инфраструктурой. Основной акцент делается на обслуживании пригородных пассажирских перевозок, ориентированных на маятниковую миграцию населения. При этом железнодорожная станция в городе-спутнике зачастую выполняет роль главного транспортного «входа» в город, формируя локальный центр активности, но не обладая многофункциональностью вокзалов города-ядра (таблица 6).

Таблица 6 – Краткая характеристика инфраструктуры железнодорожного транспорта города-спутника

Классификационный признак	Краткая характеристика
Тип узла	Линейный или локальный
Плотность путей	Средняя (небольшая)
Тип перевозок	Региональные (пригородные)
Интеграция с городским транспортом	Ограниченная
Градостроительная функция	Локальный центр

Таким образом, сравнение показывает, что различия между инфраструктурой города-ядра и города-спутника носят системный характер и отражают

иерархию расселения и функций в агломерации (таблица 7).

Таблица 7 – Сравнение инфраструктуры города-ядра и города-спутника

Классификационный признак	Город-ядро	Город-спутник
Функциональная нагрузка	Многоуровневая	Одно-, двухуровневая
Тип пассажиропотоков	Дальние и региональные (пригородные)	Преимущественно региональные
Инфраструктурная сложность	Высокая	Средняя или низкая
Влияние на застройку	Региональное	Локальное
Значимость для агломерации	Центр	Периферия

Например, Минская агломерация включает в себя населенные пункты, расположенные в пределах административно-территориальных и природно-ландшафтных районов, интегрированных в социальные, экономические и экологические процессы города-ядра, обеспечивающих его развитие и нормальное функционирование городского хозяйства (таблица 8).

Таблица 8 – Краткая характеристика железнодорожной инфраструктуры города-ядра (Минска)

Классификационный признак	Краткая характеристика
Тип пространственной модели	Радиально-полицентрическая
Функция вокзала	Центральный пассажирский и пересадочный
Сеть остановочных пунктов	Основа для развития сети городской электрички
Интеграция с городским транспортом	Высокая (метро, автобус, трамвай), но неравномерная
Морфологическое влияние	Формирование осей застройки и зон повышенной плотности
Основные проблемы	Перегрузка центрального узла
Потенциал развития	Усиление полицентричности, редевелопмент привокзальных территорий

Следует отметить, что для города-ядра (обычно крупного города) характерно сочетание радиальных железнодорожных направлений (входящих в город с разных сторон) и частичных кольцевых / полукольцевых связей (обходы, соединительные ветви, грузовые направления). В такой схеме:

- железнодорожный вокзал выполняет роль межрегионального «портала»;
- внутригородские станции / остановочные пункты – роль распределителей пассажиропотоков по районам;
- грузовые станции, сортировочные и подъездные пути формируют «второй уровень» инфраструктуры, часто конфликтующий с городской средой (барьеры, шум, разрывы связности), но критичный для экономики.

Радиальная и радиально-кольцевая модели являются одними из наиболее распространенных для крупных городов-ядер, сформировавшихся в условиях ранней индустриализации. В рамках радиальной модели железнодорожные линии сходятся к центральному

вокзалу или группе вокзалов, формируя выраженную центростремительную структуру (рисунок 5).

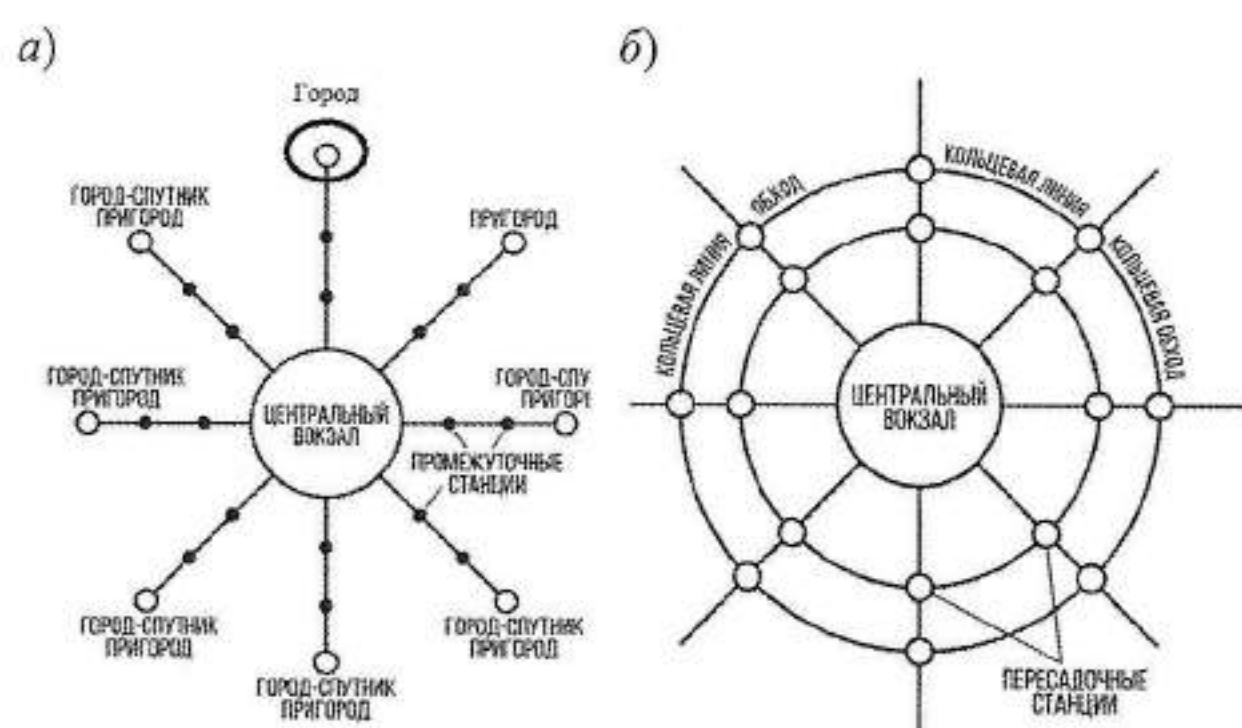


Рисунок 5 – Пространственно-планировочные модели размещения железнодорожной инфраструктуры: а – радиальная; б – радиально-кольцевая

Радиальная и радиально-кольцевая модели являются одними из наиболее распространённых для крупных городов-ядер, сформировавшихся в условиях ранней индустриализации. В рамках радиальной модели железнодорожные линии сходятся к центральному вокзалу или группе вокзалов, формируя выраженную центростремительную структуру. Радиально-кольцевая модель дополняет эту схему обходными и кольцевыми линиями, обеспечивающими перераспределение потоков и разгрузку центральных узлов. Для города-ядра данные модели создают высокую транспортную доступность центра, но одновременно формируют риски перегрузки центральных станций и прилегающих территорий.

Коэффициент концентрации железнодорожной инфраструктуры радиальной модели может быть определён по формуле

$$K_{\text{рад}} = \frac{P_{\text{ц}}}{P_{\text{г}}}, \quad (7)$$

где $P_{\text{ц}}$ – пассажиропоток, проходящий через центральную станцию города-ядра; $P_{\text{г}}$ – суммарный пассажиропоток города.

Радиально-кольцевая модель дополняет радиальную схему обходными и кольцевыми линиями, обеспечивающими перераспределение потоков и разгрузку центральных узлов.

Радиально-кольцевая модель почти всегда порождает зоны структурной поляризации: участки возле пассажирских узлов тяготеют к услугам и общественным функциям, участки вдоль грузовых фронтов – к промышленности, складам и логистике. Со временем это может приводить к необходимости «переформирования» прилегающих территорий: уплотнение объектов железнодорожной станции вокруг вокзала, вынос грузовых операций, создание транспортно-пересадочных узлов (ТПУ). Следует отметить, что когда город-ядро растёт и усложняется, вокзал как одна центральная точка уже не справляется с распределением пассажиропотоков. Возникают вторичные центры: районы деловой активности, крупные жилые массивы, университетско-медицинские кластеры, торгово-развлекательные центры. Железная дорога в таком го-

роде начинает работать эффективнее, если:

- появляется сеть остановочных пунктов вблизи плотной застройки и «точек притяжения»;
- обеспечивается короткая пересадка на метро/трамвай/автобус;
- реализуются тактовые региональные (пригородные) перевозки, близкие по логике к городскому рельсовому транспорту.

Необходимо обратить внимание на возможность применения полицентричности инфраструктуры, что снижает нагрузку на один главный вокзал, но требует некоторого усовершенствования: остановочные пункты должны быть не «формальными», а встроенными в городскую среду (пешеходный доступ, безопасные переходы, понятная навигация, связь с местными маршрутами). Полицентрическая модель характерна для крупных и сверхкрупных городов-ядер, где развитие происходило за счёт формирования нескольких центров притяжения. В этой модели железнодорожная инфраструктура распределяется между несколькими узловыми станциями, каждая из которых обслуживает собственную зону влияния (рисунок 6).

Такая структура снижает нагрузку на исторический центр и способствует более равномерному распределению пассажиропотоков, однако требует сложной координации расписаний и инфраструктурных решений.

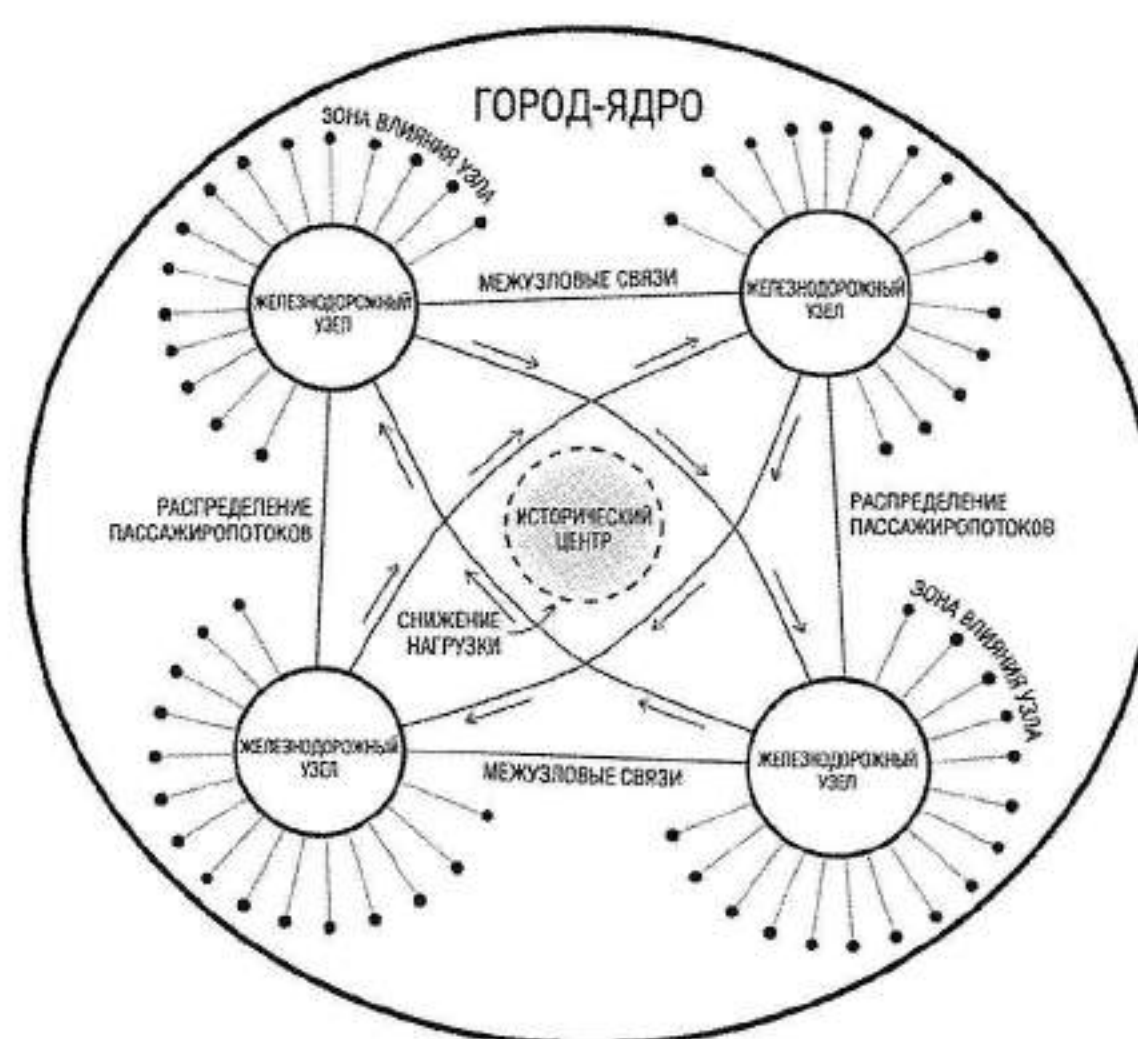


Рисунок 6 – Полицентрическая модель

Город-спутник чаще развивается вдоль железнодорожной оси или в зоне «луча» от ядра. Станция здесь – не просто точка посадки, а главный элемент образа города и его «экономический клапан»:

- утром станция «выпускает» жителей в сторону ядра (маятниковый отток);
- вечером «возвращает» их назад (маятниковый приток);
- в дневные часы может обслуживать локальные поездки (учеба, услуги, медицина) и редкие межрайонные перемещения.

Линейно-узловая структура возникает там, где спутник стоит на пересечении направлений либо рядом с промышленным узлом: тогда станция / парк путей совмещает пассажирскую и производственно-

логистическую функции, а планировочные решения становятся более конфликтными (переезды, барьерность, смешение грузовых и пассажирских потоков).

Линейная модель является наиболее распространённой для городов-спутников, сформировавшихся вдоль железнодорожных линий. В рамках данной модели городская застройка вытягивается вдоль оси железной дороги, а станция выступает основным транспортным и функциональным центром. Железнодорожная линия в этом случае не только обслуживает существующую структуру города, но и определяет направление его пространственного развития. Линейная модель обеспечивает высокую доступность железнодорожной станции для большинства населения, однако одновременно ограничивает возможности территориального расширения и диверсификации функций.

Линейно-узловая модель является развитием линейной структуры и характерна для более крупных или исторически развитых городов-спутников. В данной модели железнодорожная станция выполняет функцию узла, вокруг которого концентрируются общественные, торговые и административные функции, в то время как линейная застройка сохраняется вдоль путей. Станция в этой модели становится не только транспортным объектом, но и пространственным ядром города, определяющим его функциональную структуру и социальную активность (рисунок 7).

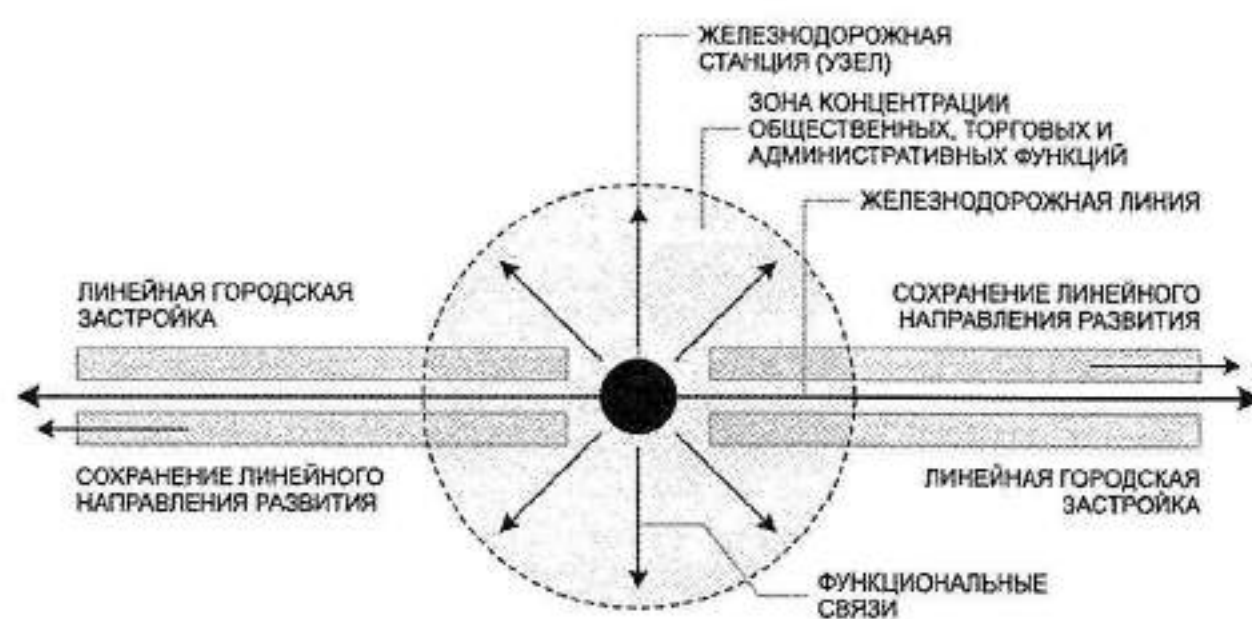


Рисунок 7 – Линейно-узловая модель

Индекс полицентричности железнодорожной инфраструктуры

$$I_{\text{пол}} = 1 - \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i}{P_{\Gamma}} \right)^2, \quad (8)$$

где P_i – пассажиропоток i -го железнодорожного узла города-ядра; P_{Γ} – суммарный пассажиропоток города.

Исследования показали, что эффективность использования железнодорожного транспорта в городской агломерации существенно возрастает при проектировании прямых железнодорожных маршрутов, непосредственно соединяющих пригород или город-спутник с мультимодальными пересадочными узлами. Предпочтения пассажирами железнодорожного транспорта оказываются уверенно прогнозируемыми, если предоставлять пассажиру не меньшую стоимость билета на конкурентном виде транспорта, а обеспечивать более удобную связь с железнодорожным или другим рельсовым видом транспорта, минимизирующую или исключаящую ожидания.

Изучение истории развития городов и их транспортного обеспечения показывает, что количество и регулярность поездок между городом-ядром и городом-спутником имеют выраженную тенденцию к росту, причём это происходит за относительно короткий промежуток времени под воздействием различных факторов. Прежде всего, существенную роль играет экономическое развитие городов-спутников, где создаются технопарки, индустриальные предприятия и научные кластеры.

Наличие рабочих мест в таких центрах формирует устойчивые маятниковые миграции: жители спутников ежедневно отправляются в метрополию по вопросам образования, здравоохранения и культурного досуга, в то время как горожане из ядра перемещаются в спутники для трудовой деятельности в промышленных и инновационных зонах.

Немаловажным фактором выступает и экологическая ситуация. В крупных городах ухудшение состояния окружающей среды, рост автомобильного трафика и высокая плотность застройки стимулируют перенос части производственных мощностей, образовательных учреждений и социально-культурных объектов в города-спутники. Это снижает нагрузку на город-ядро и одновременно увеличивает интенсивность транспортных связей с прилегающими территориями.

Особое значение приобретает развитие социальной и культурной инфраструктуры в городах-спутниках. Региональные торговые и развлекательные комплексы, культурные центры, спортивные сооружения и социальные учреждения создают новые центры притяжения для жителей агломерации.

Таким образом, маятниковые поездки перестают быть исключительно трудовыми: они всё чаще связаны с досугом, образованием, медицинским обслуживанием и бытовыми потребностями. Мировой опыт подтверждает, что при формировании агломераций структура пассажиропотоков быстро диверсифицируется. Если на начальном этапе преобладают трудовые миграции, то в дальнейшем увеличивается доля поездок, связанных с рекреацией, обучением и обслуживанием населения. Для Беларуси эта тенденция особенно актуальна, поскольку в Брестской, Гомельской и Минской агломерациях уже формируются узлы притяжения, способные перераспределять часть потоков, традиционно направленных в областные центры. В результате транспортные системы агломераций должны развиваться опережающими темпами, чтобы соответствовать растущему многофакторному спросу. Это означает необходимость проектирования железнодорожных линий и остановочных пунктов не только с учётом трудовых поездок, но и с ориентацией на многоцелевые маятниковые перемещения, которые определяют качество жизни населения и устойчивость городской среды.

Заключение. Проведенное исследование специализации пассажиропотоков города-ядра и его спутников позволяет сделать вывод о том, что структура пассажирского спроса является не случайным следствием транспортного обслуживания, а прямым отражением пространственно-функциональной организации агломерации. Различия в типах, направленности и временной структуре поездок воспроизводят распре-

деление экономических, социальных и управленческих функций между центральным городом и окружающими его территориями, формируя устойчивую, хотя и асимметричную систему транспортных связей.

Для городов-спутников характерна узкая специализация пассажиропотоков, основанная на доминировании маятниковых поездок в направлении города-ядра. Такая структура обусловлена концентрацией рабочих мест, образовательных и сервисных функций в центре агломерации и ограниченной функциональной автономией спутников. В результате пассажирские станции городов-спутников функционируют преимущественно как элементы системы ежедневной трудовой и учебной мобильности, что проявляется в выраженной пиковой нагрузке, высокой направленной асимметрии потоков и низкой степени их смещения.

Город-ядро, напротив, характеризуется многофункциональной и смешанной структурой пассажиропотоков. Здесь пересекаются входящие маятниковые потоки, внутригородские перемещения, транзитные пассажиры и межрегиональные связи. Такое наложение потоков отражает универсальную роль города-ядра как экономического, культурного и транспортного центра агломерации и формирует качественно иную нагрузку на инфраструктуру. Станции города-ядра выступают не

только пунктами отправления и прибытия, но и сложными узлами перераспределения пассажирских потоков, требующими многоуровневой организации и высокой пропускной способности.

Список литературы

1 Организация пригородных железнодорожных перевозок: учеб. пособие / Ю. О. Пазойский, С. П. Вакуленко, А. В. Колин [и др.]; под ред. Ю. О. Пазойского. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. трансп. 2015. – 270 с.

2 Власюк, Т. А. Железнодорожный пассажирский транспорт в территориальной структуре городов-центров и их спутников в Республике Беларусь (ретроспективный анализ и перспектива развития) : монография / Т. А. Власюк. – Гомель : БелГУТ, 2020. – 230 с.

3 Власюк, Т. А. Особенности развития инфраструктуры железнодорожного транспорта в агломерации / Т. А. Власюк // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2025. – № 1. – С. 53–58.

4 Вучик, В. Р. Транспорт в городах, удобных для жизни / В. Р. Вучик. – М. : Территория будущего, 2011. – 574 с.

5 Жолудь, Н. И. Планировочная организация городов-спутников в условиях развития Минской агломерации / Н. И. Жолудь // Архитектура : сб. науч. тр. – Минск : БНТУ, 2019. – Вып. 12. – С. 58–63.

Получено 05.09.2025

T. A. Vlasuk. Typology of spatial and planning models of railway transport infrastructure placement in an agglomeration.

The spatial planning models for the placement of railway transport infrastructure, which largely determine the nature of the development of the agglomeration, are considered. It is shown that the differences between the core city and satellite cities reflect the functional specialization of territories and require a differentiated approach to planning. Taking these differences into account allows us to use rail transport infrastructure not only as a means of transporting passengers, but also as a tool for creating a sustainable, balanced and spatially connected agglomeration.

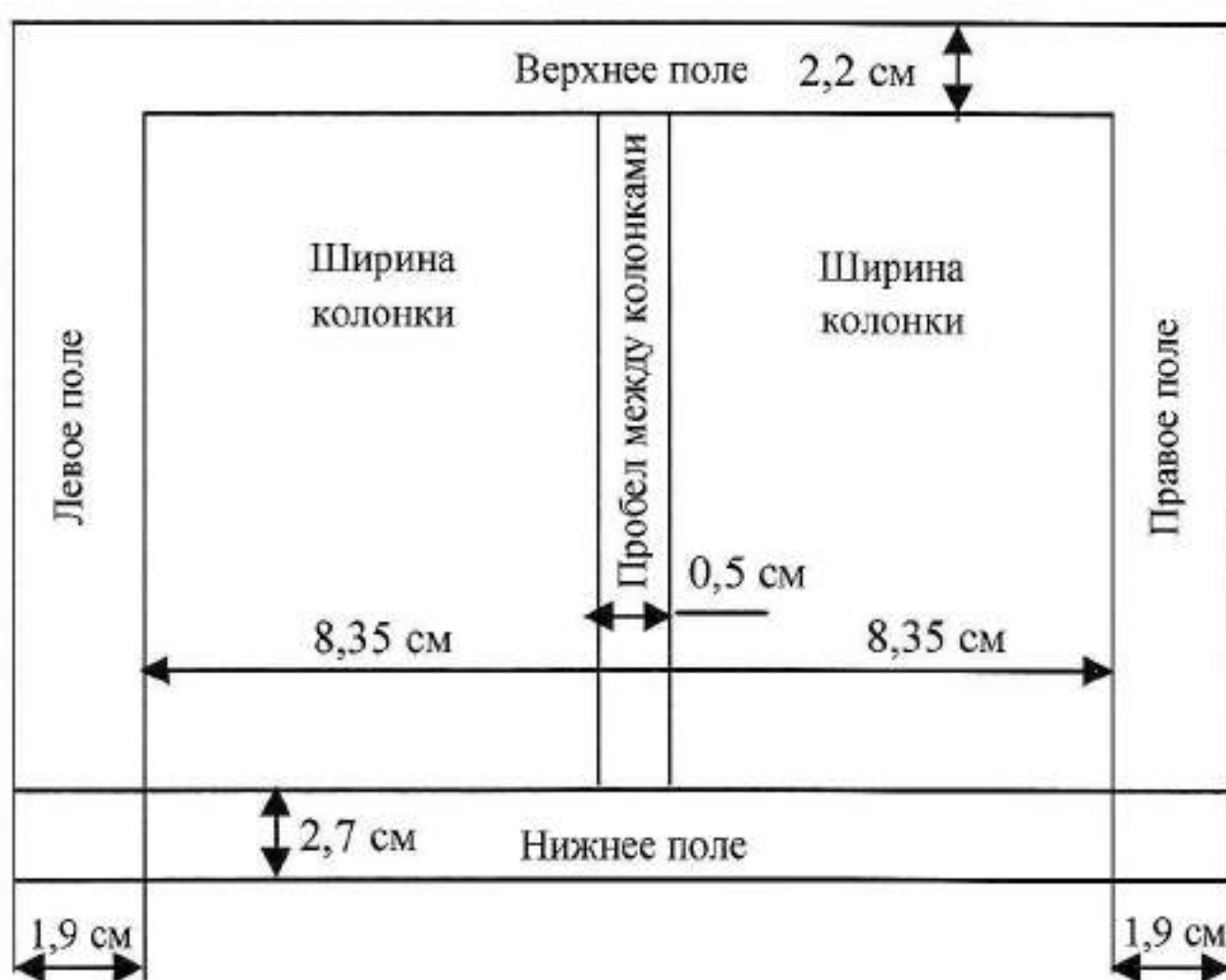
ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

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 – на английском языке фамилия, инициалы автора (авторов) – прямым жирным строчным шрифтом 10 pt, название статьи – светлым строчным прямым шрифтом 10 pt, аннотация статьи 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 строчным), 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, учёная 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.

Редакторы: *А. А. Павлюченкова, Е. Г. Привалова*
Технический редактор *В. Н. Кучерова*
Компьютерная верстка – *С. В. Ужанкова*

Подписано в печать 29.12.2025 г. Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 8,37. Уч.-изд. л. 8,93. Тираж 100 экз. Изд. № 58. Зак. № 2263.

Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта»
ЛП № 02330/238 от 14.04.2014 г.
Ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель