



Оптимизация ресурсов распределённых производственных процессов с использованием имитационного моделирования



Дарья ШКОЛИНА



Александр АДАДУРОВ



Сергей БЕХЕР

Дарья Ивановна Школина¹, Александр Сергеевич Ададунов², Сергей Алексеевич Бехер³

^{1,3} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия.

² ООО «ВНИИЖТ-Инжиниринг», Санкт-Петербург, Россия.

✉ ¹ dashashkolina@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

Процессы неразрушающего контроля в технологическом цикле вагоноремонтного предприятия в значительной степени определяют безопасность объектов железнодорожного транспорта. Наиболее эффективные способы управления такими процессами могут быть определены только в результате имитационного моделирования, позволяющего оценить устойчивость работы производственной системы в широком спектре как внешних условий, так и внутренних факторов.

Цель работы – создание способа оптимизации ресурсов распределённых производственных процессов неразрушающего контроля вагоноремонтного дела на основе имитационного моделирования для уменьшения вероятности останова производственного цикла и снижения необоснованных затрат предприятия.

Рассмотрены особенности неразрушающего контроля как этапа технологического цикла предприятия, проанализирована информация о квалификации специалистов вагоноремонтной компании. В работе позиции неразрушающего контроля и контролируемые детали описываются и анализируются в рамках теории массового обслуживания. Для

оптимизации подразделения неразрушающего контроля используется имитационное моделирование, а для обработки результатов моделирования применяются методы математической статистики и корреляционный анализ.

Построена модель подразделения неразрушающего контроля с постами на участках по ремонту деталей автоцепного устройства и тележки вагона, колёсных пар. Предложена схема управления производственным персоналом, являющаяся основой оптимизации организационной структуры подразделения неразрушающего контроля.

В результате моделирования установлены требования к квалификации дефектоскопистов вагонного ремонтного дела. Показано, что оптимальная стратегия развития подразделения должна быть направлена на обеспечение универсальной квалификации работников, при которой они обладают необходимыми компетенциями для выполнения работ на всех позициях контроля. Это позволит повысить средний коэффициент занятости дефектоскопистов с 0,34 до 0,45, а среднее время задержки детали на позиции уменьшить с 650 % до 150 % от нормативного времени.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, имитационное моделирование, производственный процесс, неразрушающий контроль, организация производства, оптимизация, дефектоскопия.

Для цитирования: Школина Д. И., Ададунов А. С., Бехер С. А. Оптимизация ресурсов распределённых производственных процессов с использованием имитационного моделирования // Мир транспорта. 2022. Т. 20. № 6 (103). С. 56–63. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-6-6>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивный путь развития современных производственных систем требует непрерывного анализа и оптимизации технологических процессов за счёт сокращения задержек между технологическими операциями, минимизации непроизводственных затрат и снижения вероятности нарушения технологических циклов [1; 2]. На этапах организации производственных процессов и принятия управленческих решений достаточно часто возникает необходимость изучения и описания структур производственных систем, определения их внутренних взаимосвязей и влияния внешних факторов [3–5]. Эксперименты с производственными процессами действующих предприятий нецелесообразны, а часто невозможны, так как в краткосрочной перспективе затраты могут во много раз превысить планируемый положительный экономический эффект.

Распространённым способом изучения процессов всех типов является имитационное моделирование, направленное на исследование законов поведения сложных техни-

ческих систем и прогнозирование их развития [6–9]. Моделирование позволяет определить наиболее эффективные способы управления за счёт опробования разных воздействий на систему в широком спектре как внешних условий, так и внутренних факторов [10–16].

Всё это приобретает особое значение для сложных процессов, встроенных в технологический цикл и распределённых по разным участкам предприятия, входы которых описываются случайными величинами. Характерным примером таких процессов является неразрушающий контроль (далее НК), от достоверности результатов которого напрямую зависит безопасность объектов железнодорожного транспорта.

Цель исследования заключается в разработке способа оптимизации ресурсов распределённых производственных процессов неразрушающего контроля вагоноремонтного депо на основе имитационного моделирования, направленного на снижение вероятности остановки производственного цикла и непроизводственных затрат предприятия.

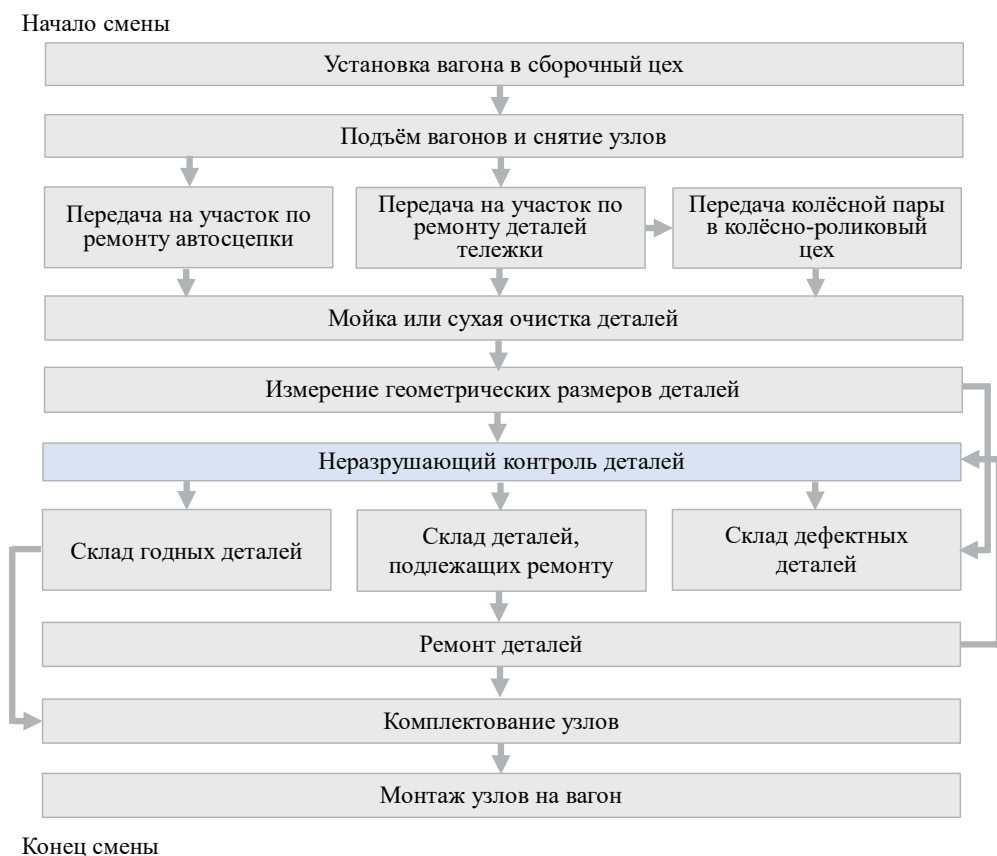


Рис. 1. Укрупнённая схема технологического цикла ремонта грузовых вагонов [выполнено авторами].



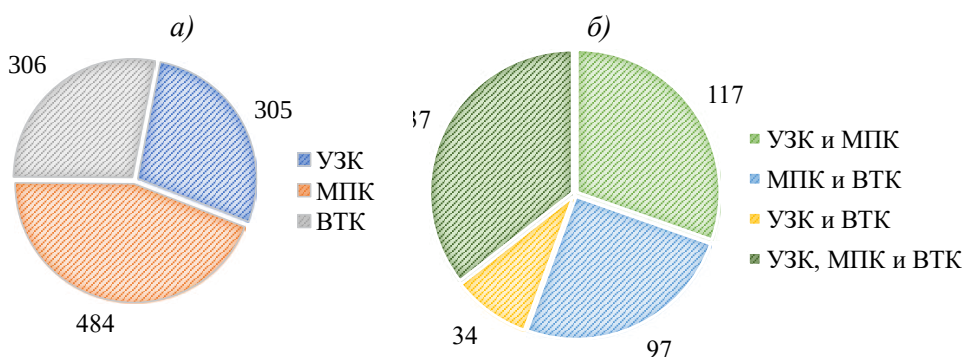


Рис. 2. Распределение дефектоскопистов по методам контроля [выполнено авторами].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Технологический цикл предприятия

Функционирование вагонного хозяйства основано на планово-предупредительной системе ремонтов, которая включает в себя техническое обслуживание, текущий, деповской и капитальный виды ремонтов.

В общем виде процесс деповского ремонта состоит из следующих этапов: установка вагона в вагоноборочный участок, выкатка тележки из-под вагона, снятие узлов и передача деталей на ремонтные участки (рис. 1). Ремонт грузовых вагонов включает в себя НК, основная цель которого заключается в своевременном обнаружении дефектов в узлах и деталях, направленном на уменьшение рисков отказа или аварий подвижного состава в эксплуатации.

Процесс НК реализуется в структурных подразделениях предприятий: на производственных участках, в лабораториях, цехах. Основная сложность управления подразделением НК связана с распределённостью позиций контроля по подразделениям основного производства: колёсно-роликовый цех, участки по ремонту деталей тележек вагона и автосцепного устройства.

Контроль проводят дефектоскописты, сертифицированные по одному или нескольким методам: магнитопорошковый (далее МПК), ультразвуковой (далее УЗК), вихретоковый (далее ВТК). Основные работы при этом не автоматизированы, и поэтому влияние человеческого фактора на результаты контроля является значительным. Дефектоскописты в работе рассматриваются как ресурсы производственной системы НК. В соответствии с действующей нормативной документацией дефектоскописты должны подтвер-

дить свою компетентность в уполномоченных квалификационных организациях путём прохождения процедуры сертификации в секторе «Железнодорожный транспорт» [17].

Проанализированы сведения о квалификации 834 дефектоскопистов 42 вагонных ремонтных депо (рис. 2). Наибольшее число специалистов сертифицировано по МПК, что коррелирует с распространённостью метода в соответствии с действующими нормами. Всего 16 % дефектоскопистов сертифицированы одновременно на три метода контроля. Квалификацию по двум методам подтвердили 30 % дефектоскопистов (рис. 2б).

С одной стороны, одновременная сертификация на несколько методов контроля увеличивает расходы депо, но при этом такая практика даёт возможность для более эффективного использования рабочего времени дефектоскопистов за счёт их универсальности. Такой подход нашёл применение на практике в отдельных депо, его слабая распространённость свидетельствует об отсутствии единой обоснованной стратегии внедрения этого организационного решения. С другой стороны, достоверность контроля напрямую зависит от квалификации дефектоскопистов, поэтому оптимизация трудовых ресурсов для выполнения ежедневного объёма контроля деталей грузовых вагонов является ключевой задачей как с точки зрения экономической целесообразности, так и с точки зрения безопасности подвижного состава.

Имитационное моделирование

Основная задача, решаемая при моделировании, заключается в определении эффективной стратегии организации контроля и требуемого для него оптимального количества дефектоскопистов и их квалификации

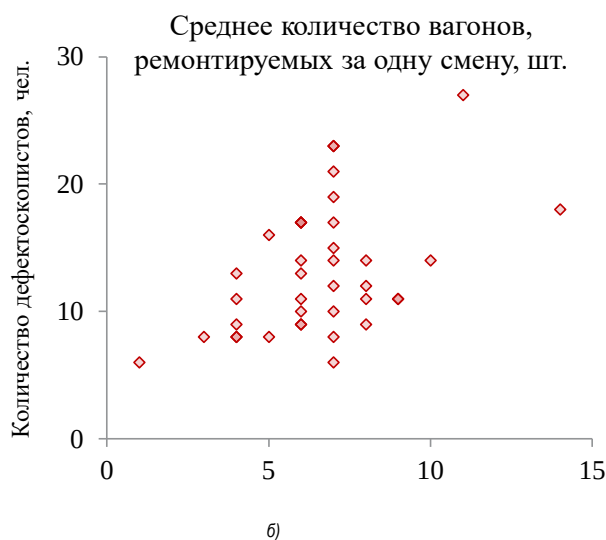
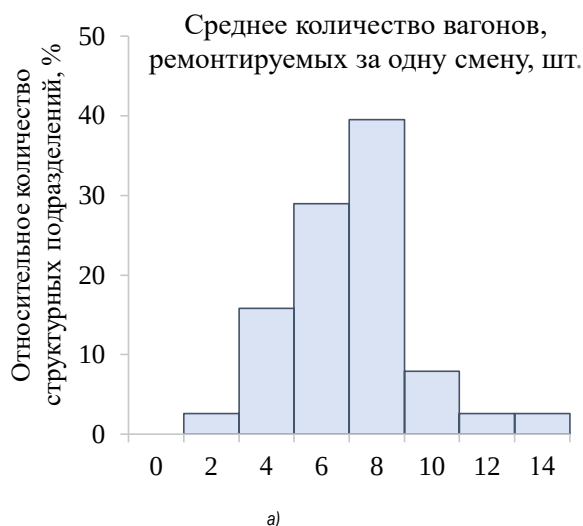


Рис. 3. Распределение вагоноремонтных предприятий (а) и дефектоскопистов (б) по объемам ремонта [выполнено авторами].

для безусловного выполнения ежесменных объемов ремонта грузовых вагонов. Необходимая информация о ежесменной программе ремонта вагонов, трудоёмкости технологических операций, режиме работы предприятия получена в результате мониторинга технологических процессов депо.

Предприятия вагоноремонтной компании проводят в среднем ремонт семи вагонов за рабочую смену (рис. 3а), при этом количество сертифицированных специалистов практически не зависит от количества поступающих в ремонт вагонов (рис. 3б), коэффициент корреляции R не превышает 0,6. Таким образом, структурные подразделения, которые выполняют НК по идентичным технологиям и используют типовые средства контроля, не

имеют единой методики определения оптимального количества дефектоскопистов.

В рамках исследования создана имитационная модель всех позиций контроля на участках по ремонту деталей тележек, сцепного устройства и колёсных пар вагонов. Исходная информация получена в результате наблюдения и анкетирования на вагоноремонтных предприятиях. Она включала ежечасное количество поступающих на позицию контроля деталей в течение рабочей смены, фактическое количество дефектоскопистов в смене и нормативное время на контроль одной детали. В модели ежечасное количество деталей, поступающих на позицию контроля, воспроизводилось генератором случайных чисел с нормальным законом



Участок по ремонту тележек

Ресурсы:
Дефектоскописты, $t_{\text{раб.}}$

Входящий поток деталей
на контроль, λ_i

Очередь на контроль, Q_i

Позиция контроля, $t_{\text{иконт.}}$

Выходящий поток
проконтролированных
деталей, λ'_i

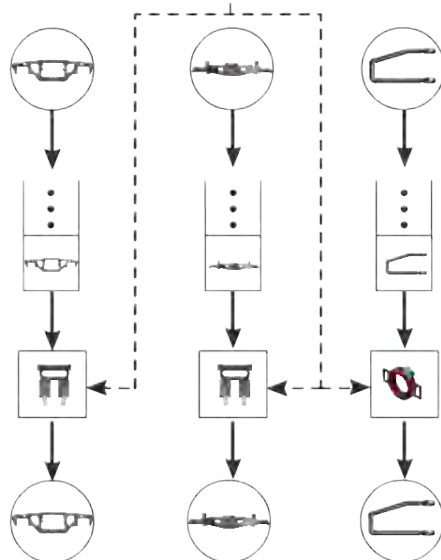


Рис. 4. Имитационная модель позиций контроля на участке по ремонту деталей тележки [выполнено авторами].

распределения. Необходимые для генератора случайных чисел средние значения количества деталей и их среднеквадратические отклонения определялись по исходной информации.

Модель производственного процесса содержит входящий поток деталей, поступающих на контроль, который характеризуется количеством деталей и временем поступления. Позиция НК описывается количеством деталей в очереди Q_i , временем контроля деталей определённого вида $t_{\text{иконт.}}$ и количеством дефектоскопистов, сертифицированных на метод контроля (рис. 4). На выходе формируется поток проконтролированных деталей с интенсивностью λ'_i . В результате выполнения модели определяется среднее время задержки деталей на позициях контроля $t_{\text{иконт}}$ и среднее время занятости дефектоскописта $t_{\text{раб}}$.

Адекватность разработанной модели проверялась сравнением количества проконтролированных деталей в депо с количеством деталей, полученных в результате моделирования за рассматриваемый период. Погрешность по каждому типу деталей не превышает 10 %.

В качестве анализируемых параметров выбраны коэффициент занятости специалиста в течение рабочей смены и количество дета-

лей в очереди на контроль (рис. 5). Производительность дефектоскописта характеризуется средним коэффициентом занятости k_3 :

$$k_3 = t_{\text{раб}} / t_{\text{см}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{раб}}$ – среднее время занятости дефектоскописта, ч;

$t_{\text{см}}$ – длительность рабочей смены, ч.

При заданных параметрах входного потока деталей параметры технологического процесса НК определяются схемой расстановки дефектоскопистов по рабочим местам. В реализации процесса с закреплением работников по позициям контроля (рис. 5а) наблюдается достаточно низкий средний за смену коэффициент занятости $k_3 \leq 0,34$ и, одновременно, нарушение технологического цикла предприятия, так как в конце смены остаются не проконтролированные детали от 2 до 15 штук (рис. 5б).

Реализация процесса с универсальными компетенциями дефектоскопистов (рис. 5в), позволяющими выполнять работы на всех позициях, повышает средний коэффициент занятости до $k_3 = 0,45$ и предотвращает срыв технологического цикла (рис. 5г).

Распределения коэффициента занятости дефектоскопистов по позициям контроля в двух рассмотренных реализациях процесса существенно различны (рис. 6). Например,

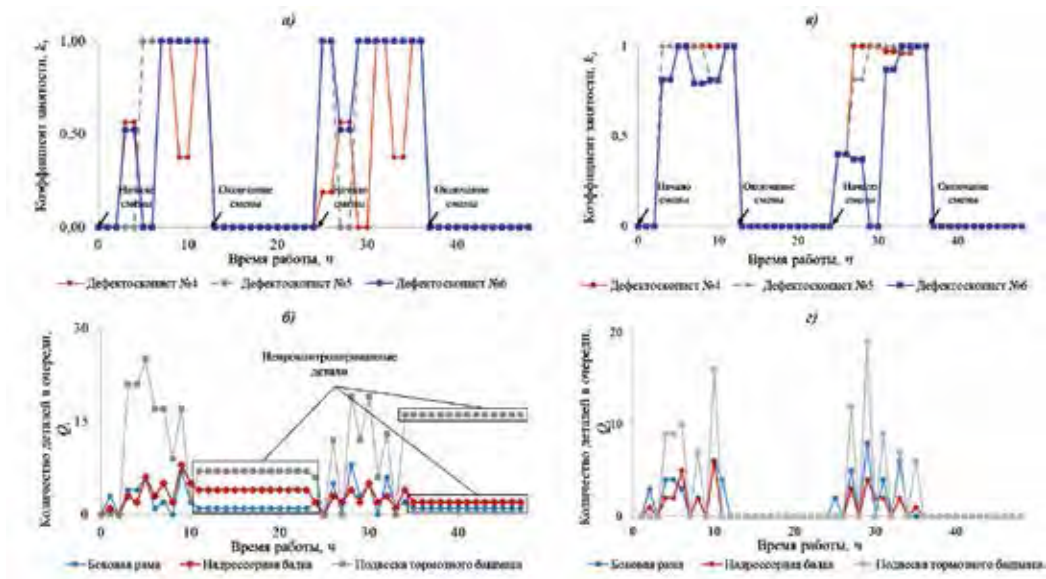


Рис. 5. Коэффициент занятости (а, в) и количество деталей в очереди на контроль (б, г) в течение времени работы на участке по ремонту деталей тележки: а, б – дефектоскописты закреплены на позициях контроля, в, г – дефектоскописты перемещаются между позициями [выполнено авторами].

в случае закрепления максимальная загруженность работников наблюдается на позиции текущего ремонта колёсных пар, на которой коэффициент занятости достигает $k_3 = 0,55$, а максимальная разница коэффициентов занятости на разных позициях составляет 0,45. При наличии у работников универсальных компетенций коэффициент занятости равномерно распределён между

дефектоскопистами, максимальная разница не превышает 0,1.

Для решения оптимизационной задачи введена целевая функция $f(b)$, которая равна отношению коэффициента занятости специалистов к коэффициенту задержки детали на позиции контроля:

$$f(b) = k_3 / k_{\text{дет}} \rightarrow \max, \quad (2)$$

где b – номер схемы кадрового состава;



Рис. 6. Средний коэффициент занятости дефектоскопистов на разных участках ремонта [выполнено авторами].



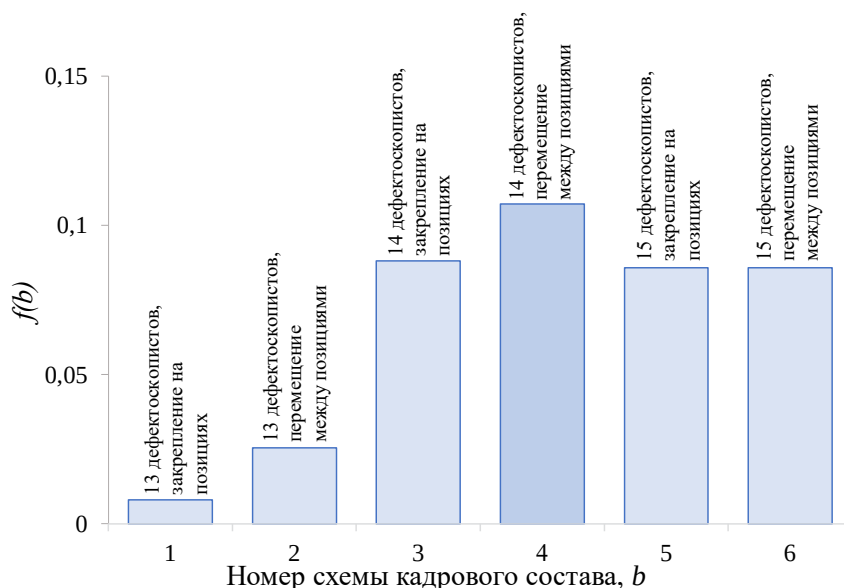


Рис. 7. График целевой функции [выполнено авторами].

$k_{\text{дет}}$ – коэффициент задержки детали на позиции контроля, равный отношению времени задержки детали на позиции НК к нормативному времени контроля.

Выбранная целевая функция управления трудовыми ресурсами подразделения НК направлена на сокращение времени задержки деталей на позиции контроля до нормативного значения и повышение коэффициента занятости специалистов. Изменяемыми параметрами задачи оптимизации являются число дефектоскопистов и их компетентность, которая позволяет или не позволяет им выполнять работы на определённых позициях контроля.

Рассмотрены шесть схем кадрового состава (рис. 7) для вагонного ремонтного депо с ежесменным объёмом ремонта от 6 до 8 вагонов. В схемах 1, 3, 5 – дефектоскописты закреплены на позициях контроля, 2, 4, 6 – дефектоскописты перемещаются с позиции на позицию по мере необходимости. Количество дефектоскопистов в схемах 1 и 2 составляет 13 человек, 3 и 4 – 14 человек, а в 5 и 6 – 15 человек. В схемах 1 и 2 из-за меньшего по сравнению с другими схемами количества работников наблюдается достаточно высокий коэффициент занятости, но при этом ежедневный объём работы не выполняется. При увеличении

количества дефектоскопистов до 15 в схемах 5 и 6 весь объём работы выполняется, но снижается коэффициент занятости и, следовательно, уменьшается производительность труда.

Наибольшие значения целевой функции соответствуют схемам 3 и 4 (рис. 7). При этом в схеме 3 с закреплёнными специалистами технологический цикл нарушается, так как не выполняется весь объём работы по НК отдельных деталей – колёсных пар вагонов. Максимум целевой функции получен для схемы 4, в которой специалисты способны выполнять контроль на любой рабочей позиции. Свободное перемещение специалистов между позициями позволяет повысить коэффициент занятости и уменьшить время задержки детали на проведение контроля при условии бесперебойной работы вагонного ремонтного депо.

ВЫВОДЫ

Проанализирована производственная среда подразделений НК в вагонной ремонтной компании и разработана имитационная модель сложного процесса, распределённого по участкам производства, направленная на оптимизацию ресурсов.

На основе имитационной модели производственного процесса НК определены требования

к квалификации дефектоскопистов вагонного ремонтного депо со средним объёмом ремонта семь вагонов. Моделирование показало, что оптимальной является стратегия, при которой специалисты сертифицированы на все методы контроля и обладают необходимыми компетенциями, это обеспечивает возможность свободного перемещения по подразделению НК и выполнения всего спектра работ. В результате оптимизации удалось повысить средний коэффициент занятости дефектоскопистов с 0,34 до 0,45, а среднее время задержки детали на позиции уменьшить с 650 % до 150 % от нормативного времени.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Большаков А. А., Слободянюк Л. А., Шашина О. Е., Ковальчук Я. А. Системный анализ, математическое моделирование и оптимизация процесса формирования производственного расписания обработки металлоконструкций // Вестник технологического университета. – 2021. – № 7. – Т. 24. – С. 84–92. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46423726>. Доступ 16.12.2022.
2. Павлова Е. С., Кошелева Н. Н., Кошелева А. И. Комплексный подход к оптимизации решения некоторых транспортно-производственных задач предприятий // Азимут научных исследований: Экономика и управление. – 2020. – № 2 (31). – Т. 9. – С. 265–268. DOI: 10.26140/anie-2020-0902-0062.
3. Fessenmayra, F., Benferb, M., Gartnerb, P., Lanzab, G. Selection of traceability-based, automated decision-making methods in global production networks. *Procedia CIRP*, 2022, Vol. 107, pp. 1349–1354. DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.156.
4. Fani, V., Antomarioni, S., Bandinelli, R., Bevilacqua, M. Data-driven decision support tool for production planning: a framework combining association rules and simulation. *Computers in Industry*, 2022, Vol. 144, 103800. DOI: 10.1016/j.compind.2022.103800 [ограниченный доступ].
5. Ito, A., Hagström, M., Bokrantz, J., Skoogh, A., Nawcki, M., Gandhi, K., Bergsjö, D., Bärning, M. Improved root cause analysis supporting resilient production systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 2022, Vol. 64, pp. 468–478. DOI: 10.1016/j.jmsy.2022.07.015.
6. Nedeliaková, E., Štefancová, V., Kudláč, Š. Six Sigma and Dynamic Models Application as an Important Quality Management Tool in Railway Companies. *Procedia Engineering*, 2017, Vol. 187, pp. 242–248. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.371.
7. Ray, D., Ramirez-Marquez, J. A Framework for Probabilistic Model-Based Engineering and Data Synthesis. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020, Vol. 193, 106679. DOI: 10.1016/j.ress.2019.106679 [ограниченный доступ].

8. Шарнин Л. М., Кирпичников А. П., Нитшаев Р. А., Заляев Б. М., Васильев В. Д., Шайхутдинов Ш. А. Моделирование задачи производства изделий с помощью Anylogic // Вестник технологического университета. – 2019. – № 4. – Т. 22. – С. 153–157. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38071957>. Доступ 16.12.2022.
9. Рожкова Е. А., Ковригина И. В., Налабордин Д. Г. Разработка и моделирование автоматизированной линии ремонта колёсных пар // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 3 (67). – С. 32–40. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.3(67).32-40.
10. Смирнов В. А. Оценка предельных параметров функционирования сложных технологических систем предприятий с общими производственными ресурсами // Транспорт Урала. – 2020. – № 3 (66). – С. 28–31. [Электронный ресурс]: <https://www.usurt.ru/download-document/10079> [полный номер]. Доступ 16.12.2022.
11. Банников Д. А., Сирина Н. Ф. Цифровая трансформация организации сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов // Современные наукоемкие технологии. – 2021. – № 3. – С. 22–26. DOI: 10.17513/snt.38525.
12. Зубков В. В., Сирина Н. Ф. Совершенствование стратегического планирования методом моделирования транспортно-производственных процессов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 4 (55). – С. 12–18. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44533406>. Доступ 16.12.2022.
13. Лакин И. К., Семёнов А. П. Использование технологии «Цифровой двойник» при управлении ремонтом локомотивов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – № 3 (63). – С. 89–98. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).89-98.
14. Erasmus, J., Vanderfeesten, I., Traganos, K., Grefen, P. Using business process models for the specification of manufacturing operations. *Computers in Industry*, 2020, Vol. 123, 103297. DOI: 10.1016/j.compind.2020.103297.
15. Rasaya, H., Taghipourb, S., Sharifib, M. An integrated maintenance and statistical process control model for a deteriorating production process. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, Vol. 228, 108774. DOI: 10.1016/j.ress.2022.108774 [ограниченный доступ].
16. Liu, Jinfeng; Wen, Xiaojian; Zhou, Honggen; Sheng, Sushan; Zhao, Peng Liu; Xiaojun, Kang; Chao; Chen, Yu. Digital twin-enabled machining process modeling. *Advanced Engineering Informatics*, 2022, Vol. 54 (6), 101737. DOI: 10.1016/j.aei.2022.101737 [ограниченный доступ].
17. Муравьев В. В. Анализ результатов сертификации специалистов в области неразрушающего контроля объектов железнодорожного транспорта // Интеллектуальные системы в производстве. 2013. – № 2 (22). – С. 144–148. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21037794>. Доступ 16.12.2022.

Информация об авторах:

Школина Дарья Ивановна – кандидат технических наук, преподаватель кафедры физики, электротехники, диагностики и управления в технических системах Сибирского государственного университета путей сообщения, Новосибирск, Россия, dashashkolina@mail.ru.

Ададунов Александр Сергеевич – кандидат технических наук, генеральный директор ООО «ВНИИЖТ-Инжиниринг», Санкт-Петербург, Россия, Adadurov.aleksandr@vniizht.ru.

Бехер Сергей Алексеевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры физики, электротехники, диагностики и управления в технических системах Сибирского государственного университета путей сообщения, Новосибирск, Россия, behers@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 24.11.2022, одобрена после рецензирования 27.12.2022, принята к публикации 29.12.2022.

