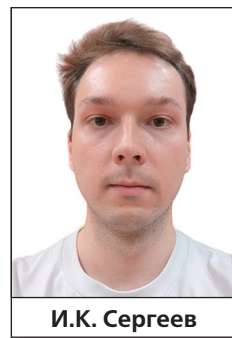


ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕМОНТА КОЛЕСНЫХ ПАР В СРЕДЕ ANYLOGIC

Дано описание процедуры создания и использования имитационной модели процесса ремонта колесных пар в условиях депо. Показаны схема моделируемого процесса ремонта колесных пар, созданная с использованием базовых блоков среды AnyLogic. Представлено описание и результаты оптимизационного эксперимента, выполненного с построенной моделью.



О.Ю. Кривич



И.К. Сергеев

Ключевые слова: AnyLogic, имитационное моделирование, текущий ремонт колесных пар, средний ремонт колесных пар

EDN: DCYIQE

К числу наиболее сложных управленческих задач относятся задачи организации производства. Обращая внимание на сферу технического обслуживания подвижного состава, можно отметить, что наиболее сложные и комплексные производственные процессы имеют место в цехах депо по обслуживанию подвижного состава. Задача организации таких процессов в условиях непрерывно меняющейся внешней среды всегда являлась актуальной и предприятия ищут различные инструменты для ее решения, формируя запросы на научные исследования.

Отвечая на запросы ремонтных предприятий железнодорожного транспорта, профильные специалисты и ученые разрабатывают математические модели и зависимости, главной целью использования которых

является организация производственного процесса с учетом оптимального распределения людских ресурсов и производственных мощностей [1–3]. Такие модели позволяют представить производственный процесс в символьном виде, а значит и подвергнуть его обработке математическим аппаратом. Однако возможность расширения и адаптации таких моделей под конкретные производственные условия как правило сопряжена с ростом общего уровня сложности математического описания, что приводит к возникновению проблем на этапе практического применения таких моделей. Альтернативным способом решения задачи организации производственных процессов является формирование особых моделей при помощи специализированных программных комплексов ими-

Кривич Ольга Юрьевна, кандидат технических наук, доцент, начальник Учебного отдела учебно-методического многофункционального центра Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: повышение эффективности технологической подготовки вагоноремонтного производства, оценка потребительских свойств продукции железнодорожного транспорта. Автор 70 научных работ.

Сергеев Иван Константинович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: динамика и прочность подвижного состава, математическое и компьютерное моделирование. Автор 40 научных работ.

Полутов Матвей Александрович, студент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: компьютерное моделирование, подвижной состав.

Мепаришвили Мария Рамазовна, студент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: компьютерное моделирование, подвижной состав.

тационного моделирования и их применения с целью генерирования статистической информации. Такой подход позволяет получить сведения об исследуемом процессе еще на этапе его проектирования, без привлечения финансовых ресурсов. Стоит отметить, что имитационные модели допускают применение символьных формул внутри собственных расчетных модулей, что позволяет проектировать сложные системы и производить наукоемкие исследования сочетая два описанных выше подхода к моделированию.

Число программ, предназначенных для описания производственных процессов растет с каждым годом. Если еще в начале 2000-х годов для решения данных задач у исследователей была возможность использовать только отдельные блоки и подпрограммы среды MS Excel, то сейчас на рынке программных продуктов процессного моделирования конкурируют десятки компаний. Часть из имеющихся продуктов имеют узкую специализацию, другие рассчитаны на решение задач широкого профиля. Например, программный инструмент ED Airport направлен на создание имитационных моделей аэропортов, а программный пакет Aspen Plus специализируется на области добычи углеводородов и нефтехимии. Инструмент ExtendSim поддерживает создание динамических моделей в широком диапазоне промышленных областей, а среда имитационного моделирования AnyLogic успела зарекомендовать себя как цифровой пакет для решения множества различных задач, начиная от модели работы кассы в магазине и заканчивая моделями распространения вируса по земному шару. Выбор велик и зачастую определяется потребностями и знаниями языков программирования авторов моделей. Учитывая это, для выполнения моделирования производственного процесса ремонта колесных пар авторы статьи остановились на продукте AnyLogic, разработанном отечественными специалистами, основанном на языке Java и зарекомендовавшем себя как надежный инструмент имитационного моделирования [4;5].

В качестве моделируемого производственного процесса был выбран процесс ремонта колесных пар в объеме текущего и среднего ремонта в условиях депо. Для получения модели исследуемый процесс был представлен в виде маршрутной технологии, составленной на основе действующей технологической документации [6]. При этом для упрощения создания модели был сделан ряд допущений:

- элементы колесных пар, требующие ремонта, после проведения ремонта складываются, а после извлекаются со склада для замены неисправных узлов;
- корпуса букс, элементы торцевого крепления подшипников, смотровые и крепительные крышки

букс, а также внутренние и лабиринтные кольца подшипников не ремонтируются, а сразу заменяются;

- процесс ремонта подшипников не детализирован, в модель закладывается среднее общее время на ремонт одного подшипника;

- оперативное время работы людских ресурсов принимается равным оперативному времени работы оборудования (т.е. людские ресурсы прикрепляются к оборудованию на все время операций и не могут покинуть оборудование до их завершения);

- не учитывается возможность повторного ремонта буксового узла по результатам выходного вибродиагностического контроля.

Составленная с учетом допущений схема маршрутной технологии ремонта колесной пары показана на рис. 1.

Представленная на рис. 1 схема соответствует маршрутной технологии ремонта колесных пар в колесно-роликовых участках депо, аккредитованных на проведение текущего и среднего ремонта колесных пар. Для составления имитационной модели необходимо было подобрать элементы библиотек среды AnyLogic, пригодные для представления составленного технологического процесса с учетом транспортных операций.

Моделирование в среде AnyLogic может быть выполнено с применением трех методов: метода агентного моделирования, метода дискретно-событийного моделирования и метода системной динамики. Кроме того, возможно сочетание нескольких методов в рамках одной модели. К примеру, диаграмму процесса удобно представить в виде дискретно-событийной модели, отметив ключевые события и переходы в соответствующих блоках диаграммы, после чего использовать специальных агентов внутри диаграммы процесса, обладающих собственным параметрами, функциями, и даже способных переходить в разные состояния. Именно такой гибридный подход был использован в данной работе. В табл. 1 представлены основные блоки среды AnyLogic, использованные при составлении модели и их краткая характеристика.

Как можно заметить из описания, часть блоков отвечает за создание, распределение и удаление агентов из процесса, другая часть блоков моделирует операции обработки, а третья часть блоков моделирует операции транспортировки. Параметры операций задаются внутри блоков, к их числу относятся время на операцию, захватываемые ресурсы, вместимость очередей и др. Стоит отметить, что AnyLogic имеет встроенный генератор случайных чисел, а также встроенные математические модели законов распределения случайной величины, что позволяет учитывать характер случайных процессов, моделируемых в

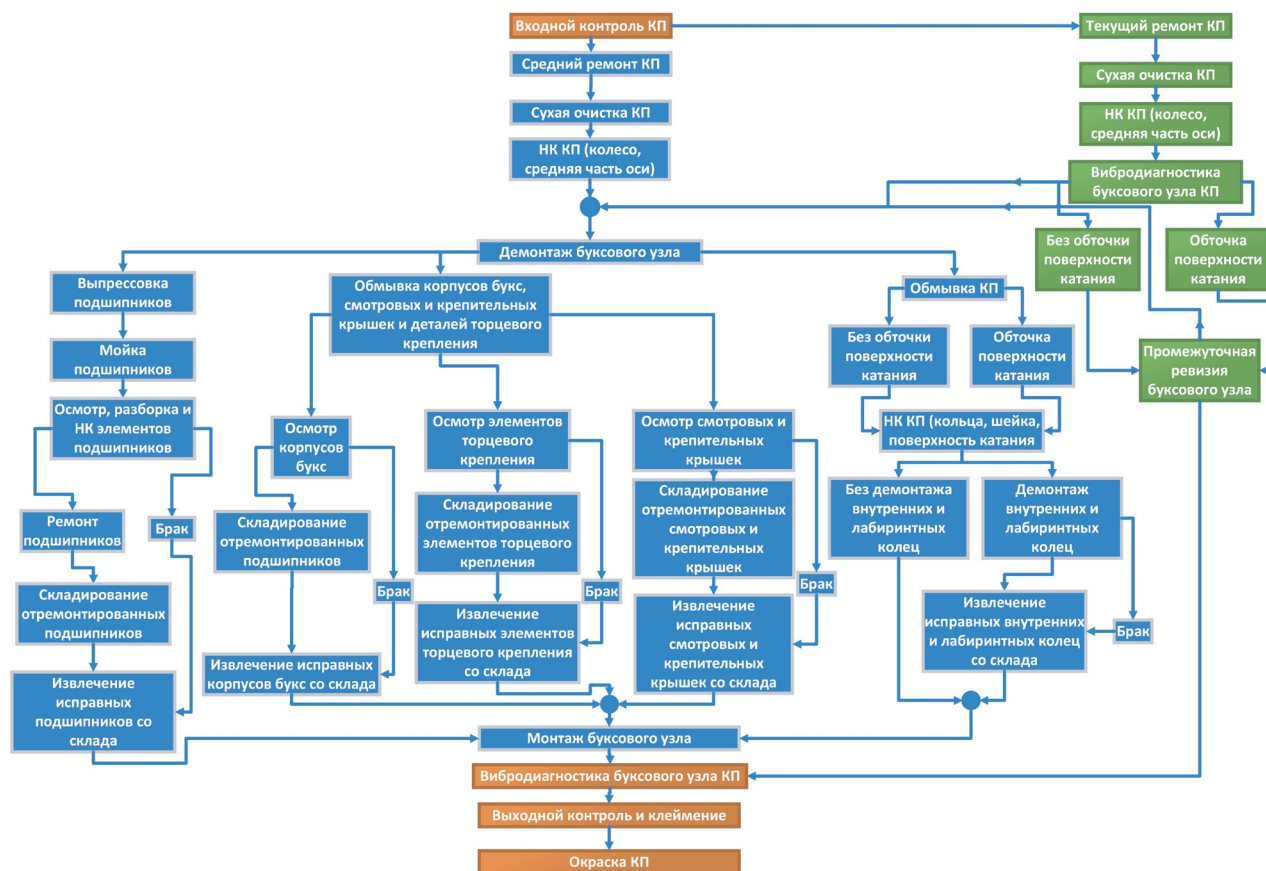


Рис. 1. Схема маршрутной технологии ремонта колесных пар

данной среде. Выбор подходящего закона распределения для конкретной производственной задачи является отдельной задачей, требующей глубоких фундаментальных исследований и обработки большого числа статистических данных. В связи с чем, в данной работе для большинства моделируемых операций было использовано треугольное распределение, применяемое в тех случаях, когда известны только допустимые границы нахождения случайной величины (в данном контексте это максимальное и минимальное время на технологическую операцию) и ее наиболее вероятное значение (рис. 2). Кроме того, был учтен сменный характер работы людских ресурсов, а также было принято, что характер поступления заявок на ремонт соответствует пуассоновскому потоку.

Выражение для плотности треугольного распределения имеет следующий вид:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2(x - \min)}{(\max - \min)(\text{mode} - \min)} n_{pu} & \min < x \leq \text{mode}; \\ \frac{2(\max - x)}{(\max - \min)(\max - \text{mode})} n_{pu} & \text{mode} < x \leq \max. \end{cases}$$

где x — значение случайной величины;

$\max$ — максимальное значение случайной величины;

$\min$ — минимальное значение случайной величины;

mode — наиболее вероятное значение (мода) случайной величины.

В нотации AnyLogic треугольное распределение может быть задано выражением $\text{triangular}(\min, \max)$, в этом случае значение моды будет рассчитано как половина суммы минимального и максимального значения случайной величины.

Таблица 1

Базовые блоки AnyLogic, примененные в данной модели

Имя блока	Графическое обозначение	Назначение
Sink		Создает агентов (поступающие в ремонт колесные пары, извлекаемые со склада детали на замену и др.)
Service		Моделирует процесс обслуживания агентов ресурсами (обмывка колесных пар, осмотр корпусов букс и др.)
Seize		Моделирует выдачу заданий ресурсам по перемещению агентов (оператору крана приступить к управлению, слесарю прокатить колесную пару по рельсовому пути и др.)
Move ByCrane		Моделирует перемещение колесных пар краном-балкой на различные позиции
Convey		Моделирует перемещение элементов по конвейеру (перемещение подшипников в роликовое отделение, транспортировка корпусов букс на позицию осмотра и др.)
MoveTo		Моделирует перемещение агента людским ресурсом (прокатка колесной пары слесарем, перенести корпус буксы на позицию монтажа и др.)
Release		Освобождает захваченные ресурсы (освободить оператора крана по окончании транспортировки колесной пары, освободить слесаря по окончании прокатки колесной пары и др.)
Select Output		Направляет поток агентов по нужному пути согласно условию или вероятности (распределение колесных пар по линиям среднего и текущего ремонта, браковка узлов с заданной вероятностью и др.)
Split		Создает два потока агентов из одного, используется для моделирования результата операций разборки (снять буксу с колесной пары, извлечь блок подшипников из буксы и др.)
Combine		Объединяет два потока агентов в один, используется для моделирования результата операций сборки (установить буксу на колесную пару, монтировать лабиринтные кольца на ось и др.)
Batch		Объединяет два однотипных агента в партию, используется для формирования комплектов с нужным числом элементов (объединить два подшипника в комплект, объединить две буксы в партию и др.)
Match		Синхронизирует два потока агентов между собой, используется для задания буферной очереди перед операциями сборки
Time Measure Start		Начинает отсчитывать время для пропущенного агента (используется для сбора статистики)
Time Measure End		Прекращает отсчитывать время для пропущенного агента (используется для сбора статистики)
Sink		Удаляет агентов из системы (отремонтированные колесные пары, забракованные детали и др.)

Общий вид составленной модели представлен на рис. 3–5. Приведем краткое описание моделируемого процесса. При входе в модель поток агентов «колесная пара» попадает на входной контроль, проводимый бригадиром, после чего с помощью кран-балки перемещается на позицию сухой очистки средней части оси. Далее колесная пара поступает на диагностику.

Подача колесных пар осуществляется слесарями вручную по рельсовому пути.

По результатам неразрушающего контроля с учетом результатов входного контроля колесные пары делятся на требующие текущего или среднего ремонта, после чего поток агентов разделяется. Колесные пары, требующие среднего ремонта, перемещаются

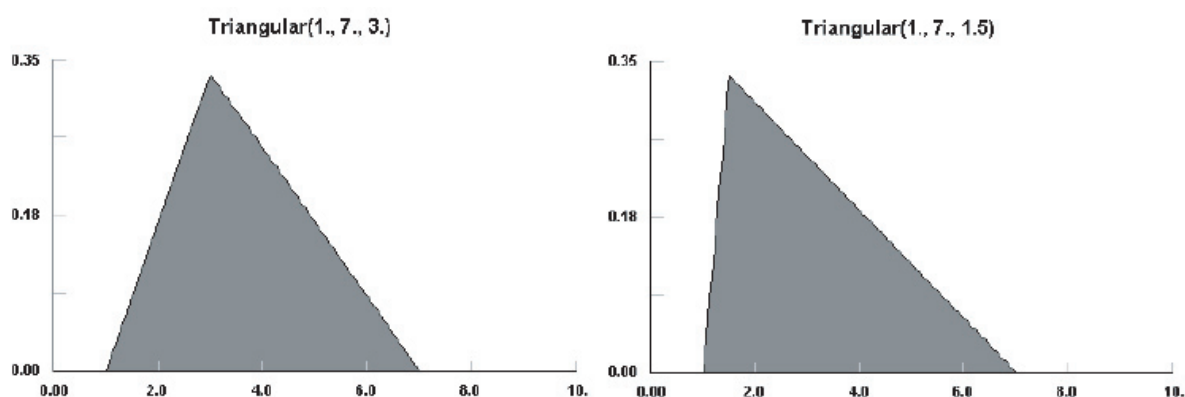


Рис. 2. Пример функции плотности вероятности треугольного распределения

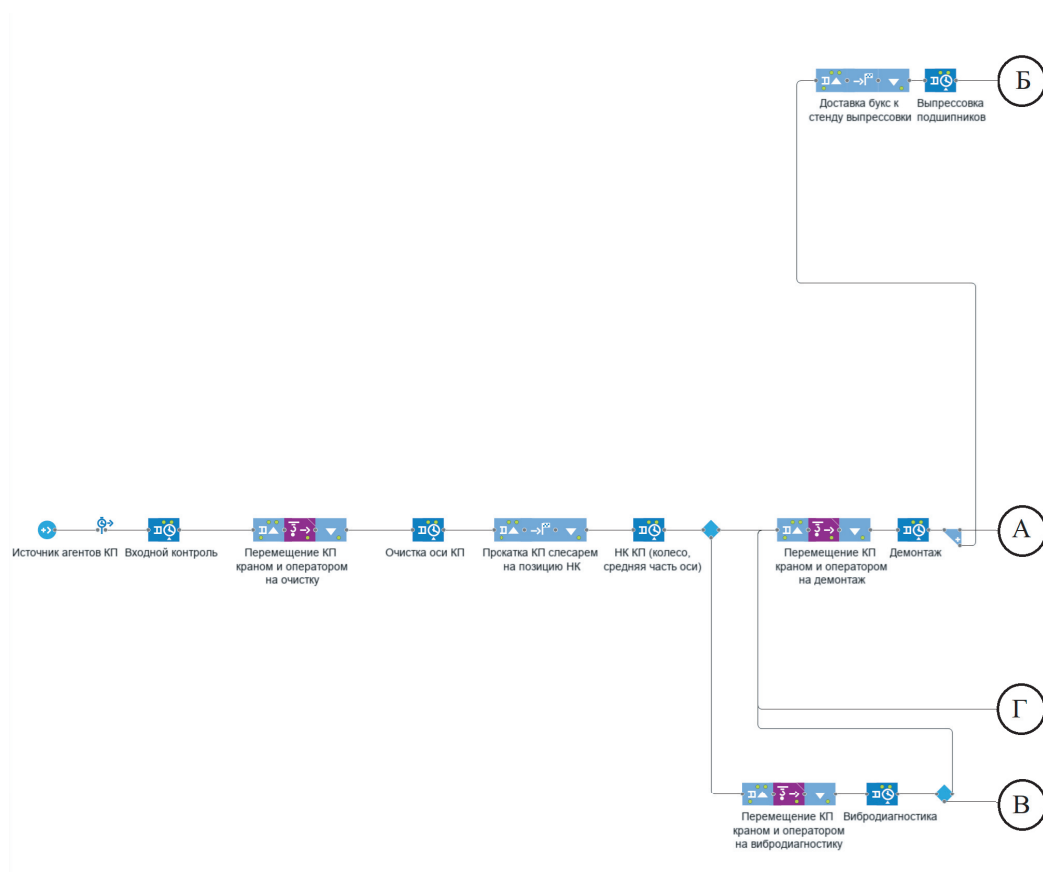


Рис. 3. Диаграмма процесса ремонта колесных пар (часть 1)

кран-балкой на позицию демонтажа, где агенты типа «букса» отделяются. Колесным парам при необходимости выполняется обточка, после чего производят диагностику шейки оси, а также при необходимости демонтаж внутренних и лабиринтных колец с контролем размеров. После чего производят процедуру монтажа исправных буксовых узлов.

Колесные пары, требующие текущего ремонта, перемещаются на отдельный путь кран-балкой, где проходят процедуру вибродиагностического контроля. По результатам вибродиагностики буксовых узлов часть колесных пар отправляется на линию

среднего ремонта. После вибродиагностики колесные пары поступают на промежуточную ревизию буксовых узлов, по результатам которой часть колесных пар также может отправиться на линию среднего ремонта.

Далее колесным парам при необходимости выполняется обточка, после чего два потока агентов типа «колесная пара» вновь объединяются и поступают в единую очередь на заключительные операции контроля, клеймения и окраски.

Буксовым узлам проводят процедуры согласно рис. 1, при этом неисправным узлам мгновенно (без

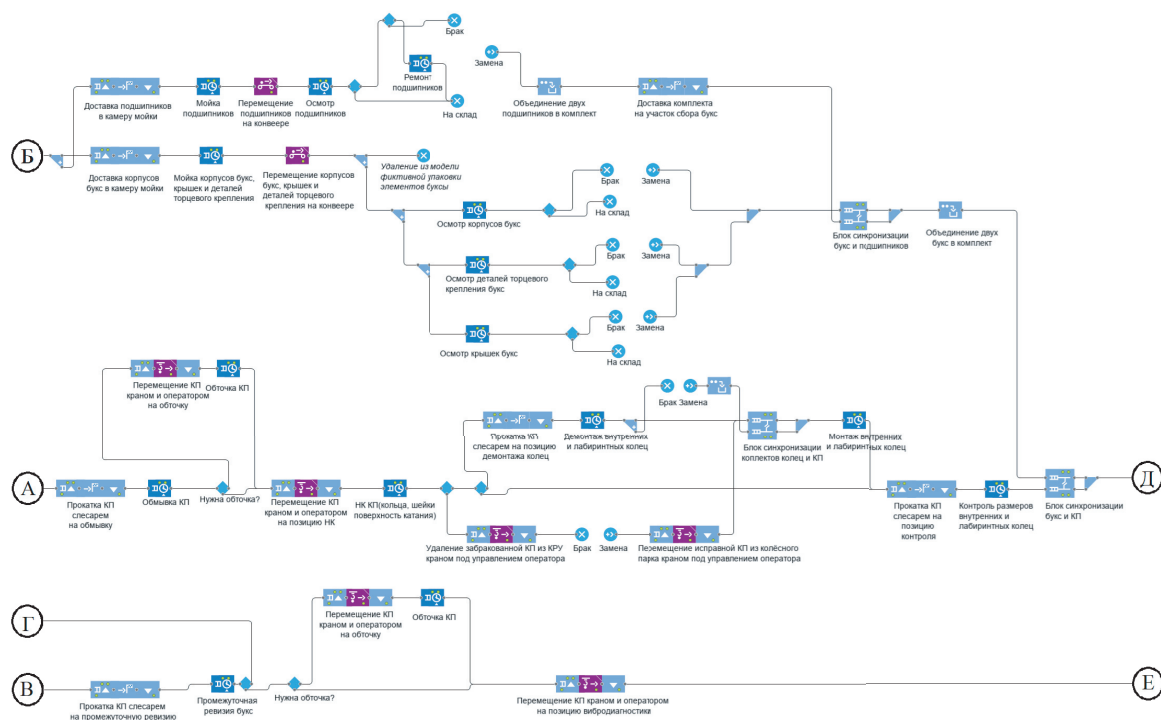


Рис. 4. Диаграмма процесса ремонта колесных пар (часть 2)



Рис. 5. Диаграмма процесса ремонта колесных пар (часть 3)

задержки) подбирают замены, а уже потом выполняют ремонт. Объединение исправных буксовых узлов и колесных пар происходит на позиции монтажа.

Созданная модель позволяет исследовать процесс в течение любого интервала времени. Для настройки ресурсов, оборудования и иных параметров модели были использованы данные производственного процесса, собранные в ходе производственной практики студентов, статистика, а также типовые нормы времени на операции, приведенные в специальной литературе

[7]. Данные прогонов модели, выполненных при подготовке настоящей работы указаны в табл. 2.

Результаты первого прогона модели свидетельствуют, что ресурс слесарей является наиболее загруженным (рис. 6,а). Указанное приводит к увеличенному времени обслуживания колесных пар в связи с возникновением большого числа очередей на различных участках модели.

Из второго прогона следует, что добавление двух ставок слесарей в штатное расписание участка (по

Таблица 2

Конфигурации прогонов модели

№ п/п	Людские ресурсы		Входящий поток колесных пар, шт./мес.	Время моделирования, мес.
	Название ресурса	Количество, чел.		
1	Бригадиры	1	800	12
	Слесари	3		
	Дефектоскописты	2		
	Токари	2		
	Крановщики	2		
	Слесари роликового отделения	4		
2	Бригадиры	1	800	12
	Слесари	4		
	Дефектоскописты	2		
	Токари	2		
	Крановщики	2		
	Слесари роликового отделения	4		

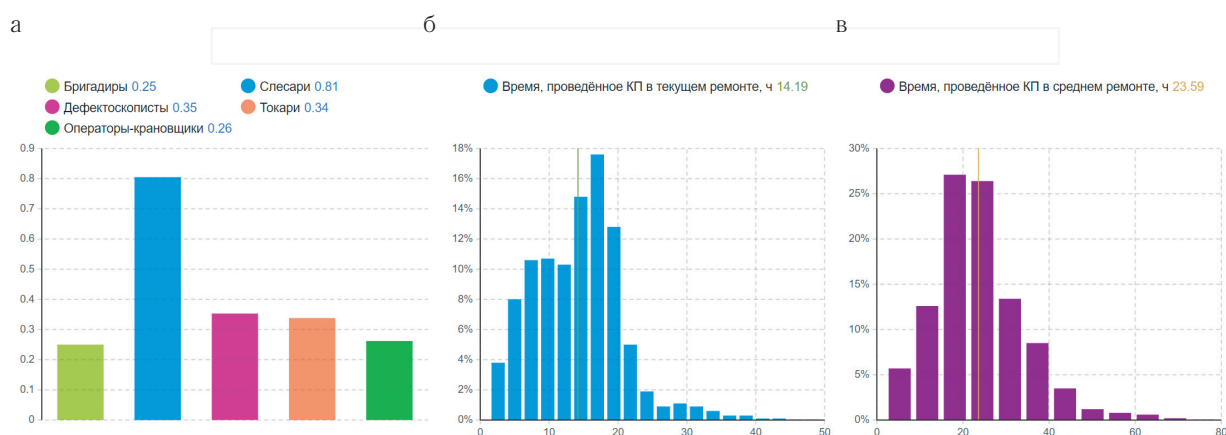


Рис. 6. Результаты первого прогона модели: а – коэффициенты использования людских ресурсов; б – график плотности вероятности и среднее значение времени нахождения колесной пары в текущем ремонте; в – график плотности вероятности и среднее значение времени нахождения колесной пары в среднем ремонте

одной в колесный и роликовый участки) сокращает нагрузку на данные типы ресурсов, а также положительно сказывается на показателе среднего времени ремонта колесных пар (рис. 7,а). Анализируя результаты расчета времени, проведенного колесными парами в ремонте, можно заметить, что при увеличении штата слесарей среднее время среднего ремонта колесных пар снижается на 12%. При этом модель стабильна в обеих конфигурациях в течение всего времени прогонов (то есть очереди на вход к операциям не переполняются агентами). Стоит подчеркнуть, что получить аналитическое выражение для связи входного параметра типа «число ресурсов» и выходного параметра типа «время на ремонт» крайне затруднительно, а имитационное моделирование является удобным способом решения подобных производственных задач, играющих ключевое значение в управлении предприятием.

Отметим также изменение формы диаграммы распределения плотностей вероятности нахождения

колесных пар в ремонте между прогонами модели. Особенно ярко это наблюдается при анализе процесса среднего ремонта. На рис. 6,в видно, что для части колесных пар этот вид ремонта был выполнен за 8 и более часов, в то время как при увеличенном числе слесарей в цехе (рис. 7,в) максимальное значение времени, проведенном в среднем ремонте не превышает 6 часов. Проведенный оптимизационный эксперимент является лишь одним из множества потенциально возможных. Среда AnyLogic предоставляет пользователю широкий набор инструментов обработки статистики и даже встроенный механизм оптимизации параметров модели. В результате дальнейшего процесса работы с моделью можно уточнить число необходимого оборудования, выполнить экономический расчет путем привязки финансовых показателей к агентам модели и создать планировку цеха с учетом необходимых средств технологического оснащения участка, средств транспортировки ремонтируемых узлов и транспортных потоков.

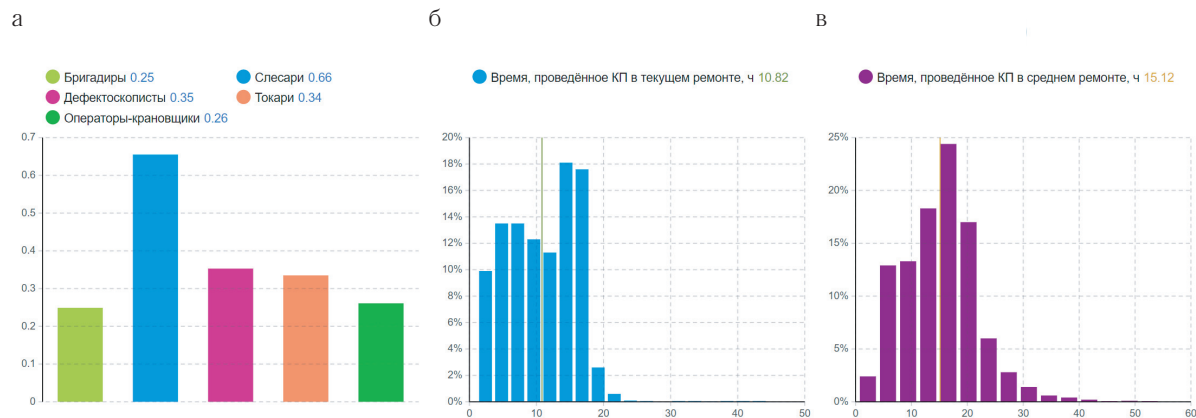


Рис. 7. Результаты второго прогона модели: а – коэффициенты использования людских ресурсов; б – график плотности вероятности и среднее значение времени нахождения колесной пары в текущем ремонте; в – график плотности вероятности и среднее значение времени нахождения колесной пары в среднем ремонте

Литература

1. Сергеев, К. А. Декомпозиция задач ТПП вагоноремонтного производства / К. А. Сергеев, О. Ю. Кривич, О. И. Мироненко. - Текст : непосредственный // Наука и техника транспорта. - 2022. - № 1. - С. 8-10.
2. Сергеев, К. А. Математическое описание ремонтируемых вагонов и их узлов / К. А. Сергеев, О. И. Мироненко, О. Ю. Кривич. - Текст : непосредственный // Наука и техника транспорта. - 2022. - №3. - С. 21-24.
3. Сергеев, К. А. Построение структурной модели технологического процесса ремонта вагонов / К. А. Сергеев, О. Ю. Кривич, И. К. Сергеев. - Текст : непосредственный // Наука и техника транспорта. - 2021. - № 4. - С. 72-73.
4. Оптимизация цепей поставок с помощью имитационного моделирования в AnyLogic / Р. М. Мухтарбекова, А. К. Долотбакова, Ю. С. Бубликова, Э. И. Исмаилова. - Текст : непосредственный // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. - 2021. - № 2(58). - С. 102-106.
5. Псеровская, Е. Д. Исследование возможностей использования инструмента имитационного моделирования AnyLogic в организации работы контейнерного терминала / Е. Д. Псеровская, О. Б. Шерстобитова, Д. А. Басманов. - Текст : непосредственный // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. - 2023. - № 4(60). - С. 71-83.
6. Кривич, О. Ю. Производство и ремонт подвижного состава : учебное пособие / О. Ю. Кривич; Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II. - Москва : Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II, 2016. - 216 с. - Текст : непосредственный.
7. Комплект документов на типовой технологический процесс ремонта колесных пар с цилиндрическими роликовыми подшипниками ТК-304 ; утверждено Распоряжением ОАО «РЖД» от 27 декабря 2018 г. № 2812/р. - 156 с. - Текст : непосредственный.