

УДК 658.5+658.18:005.591.1
DOI: 10.22213/2413-1172-2026-3-33-44

Оптимизация потока создания ценности при сборке БПЛА на основе интеграции бережливого производства, имитационного моделирования и элементов роботизации

И. А. Андреев, Северо-Западный региональный центр концерна ВКО «Алмаз-Антей» – Обуховский завод», Санкт-Петербург, Россия

Е. В. Яшихина, Северо-Западный региональный центр концерна ВКО «Алмаз-Антей» – Обуховский завод», Санкт-Петербург, Россия

В статье представлены результаты оптимизации процесса серийной сборки беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) на предприятии оборонно-промышленного комплекса с использованием инструментов бережливого производства и имитационного моделирования в среде AnyLogic. На основе картирования потока создания ценности, хронометража и фотографии рабочего дня выявлены и количественно оценены основные виды потерь, включая ожидание, излишнюю транспортировку, дефекты и нерациональные перемещения персонала. Разработана имитационная модель, позволившая обосновать переход от стапельной к поточной организации сборки с разделением процесса на 18 последовательных постов. Проведенные вычислительные эксперименты обеспечили определение оптимального количества рабочих мест на каждом посту, что позволило повысить сменный выпуск продукции в 5,7 раза без увеличения численности персонала, снизить дисперсию загрузки работников с 0,007 до 0,004 и сформировать временной резерв у 70 % сотрудников. Экономический эффект от устранения потерь составил 31,6 млн руб. Для развития полученных результатов предложены направления перехода к бережливому роботизированному производству, включая автоматизацию межоперационной логистики с использованием автоматических транспортных средств, внедрение алгоритмов бесступенчатого регулирования буферных зон для минимизации незавершенного производства, контроль шумовых эмиссий на роботизируемых участках и квалиметрическую оценку приоритетов роботизации на основе эксплуатационных коэффициентов. Разработанные подходы могут быть тиражированы на предприятиях оборонно-промышленного комплекса (ОПК) при организации многономенклатурной поточной сборки высокотехнологичной продукции.

Ключевые слова: бережливое производство, имитационное моделирование, AnyLogic, БПЛА, поток создания ценности, потери, роботизация, буферные зоны, квалиметрия, ОПК.

Введение

В современных экономических и геополитических условиях выполнение организациями ОПК государственного оборонного заказа (ГОЗ) в установленные сроки и надлежащего качества является необходимым условием гарантированного обеспечения безопасности Российской Федерации и защиты ее национальных интересов. Исходя из этого Президентом и Правительством РФ перед ОПК страны поставлены задачи по сокращению затрат на выполнение ГОЗ за счет оптимизации производственных (операционных) процессов. С началом специальной военной операции, в условиях санкций и ограничений импортных поставок особенно актуальным стал показатель производительности труда, как в военном, так и в гражданском направлении. Для предприятий ОПК установлены нормативы по конверсии и диверсификации деятельности организаций ОПК с целью вывода на рынок высокотехнологичной конкурентоспособной продукции двойного и гражданского назначения [1]. Одним из необходимых условий решения этих задач является наличие в организации ОПК результативной системы менеджмента бережливого производства (БП), обеспечивающей повышение операционной эффективности основных видов производственной деятельности и снижение непроизводительных издержек в производственных процессах и операциях.

Постоянное улучшение производственных процессов обеспечивает повышение конкурентоспособности организации ОПК не только на рынке вооружений, но и на рынке высокотехнологичной гражданской продукции, где методы и инструменты БП нашли применение и доказали свою эффективность еще более 70 лет назад [2]. При этом сложившийся в российских организациях ОПК подход к внедрению БП в ряде случаев не позволяет достичь желаемого экономического эффекта [3]. Ценообразование, отличное от рыночного, и специфика производства образцов вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) не позволяют российским организациям ОПК в полной мере тиражировать опыт ведущих промышленных корпораций [4]. Рациональное применение методов и инструментов БП требует их адаптации к особенностям производственной деятельности российских организаций ОПК. В связи с этим актуальной является задача построения потоков создания ценности организации на основе принципов БП.

В АО «НПО «Обуховский завод» одним из векторов диверсификации является разработка и производство изделий двойного назначения, включая БПЛА. На текущий момент портфель компетенций предприятия включает широкий спектр разработок БПЛА на различных стадиях жизненного цикла – от перспективных прототипов до серийно выпускаемых моделей. В рамках реализации рыночного потенциала

предприятием обеспечивается выполнение значимых контрактов на крупносерийное производство БПЛА типа FPV (first person view или вид от первого лица).

Цель исследования – оптимизация производственного процесса путем перехода к поточной организации производства. С помощью картирования потока создания ценности и имитационного моделирования определена оптимальная конфигурация процесса, развитие которой предполагает внедрение элементов роботизации для повышения эффективности.

Измерение и анализ текущей ситуации

Текущая производственная модель Обуховского завода ориентирована на гибкое производство. При

существенном росте объемов выпуска и переходе к крупносерийным партиям требуется масштабная реконфигурация производственных процессов, предполагающая трансформацию стапельных методов на поточные. Основными минусами стапельного производства, когда изделие производится на одном месте от начала до конца, являются: сложность прослеживаемости готовности операций; загроможденность рабочих мест комплектацией; излишние запасы инструмента и покупных комплектующих и непрозрачность управления процессами. Основные потери в потоке создания ценности представлены в таблице 1.

Таблица 1. Потери в потоке создания ценности сборки БПЛА

Table 1. Losses in the value stream of UAV assembly

Название / Name	Выражение / Expression	Результат / Result
Перепроизводство / Overproduction	Наиболее простые сборочные узлы собирались в большем объеме, чем требовал план по выпуску / The simplest subassemblies were assembled in greater quantities than the production plan required	Дополнительные площади для хранения сборок. При корректировке конструкторской документации приходилось переделывать весь задел / Additional storage space for assemblies. When adjusting design documentation, the entire backlog had to be redone
Лишние движения / Unnecessary movements	Нерациональное размещение рабочих мест и вспомогательных зон / Inefficient Placement of Workstations and Auxiliary Areas	Потери времени на перемещения для выполнения основных и вспомогательных операций (до 10 % от общего времени) / Time Lost on Movement for Primary and Auxiliary Operations (up to 10% of Total Time)
Ненужная транспортировка / Unnecessary transportation	Не поточная логистика организации перемещения деталей и сборочных единиц по ПСЦ / Inefficient Flow Logistics for Organizing the Movement of Parts and Assemblies through the Production Center	Затраты времени на логистику основными производственными рабочими на следующие технологические переделы занимали (до 15 % от общего времени) / Time Lost on Logistics by Key Production Workers for Subsequent Processing Steps (up to 15% of Total Time)
Излишние запасы / Excess inventory	Избыточная поставка комплектующих на рабочие места, сразу на целую смену вперед, иногда на другие (опытные) изделий / Excessive Component Delivery to Workstations, Enough for an Entire Shift, Sometimes for Other (Test) Products	Захламленность рабочих мест комплектацией других изделий, неравномерность поставки приводила к потерям сборщика на сортировку и подготовку к работе / Workstations Overcrowded with Assemblies of Other Products and Uneven Delivery Results in Assembler Losses Due to Sorting and Preparation
Избыточная обработка / Excess processing	Некоторые операции выполнялись с избыточными требованиями. Например, нанесение фиксатора резьбы там, где это не прописано / Some operations were performed with excessive requirements. For example, applying thread-locker where it was not specified	Потери времени и финансов на добавление избыточной ценности / Time and Money Lost on Adding Excess Value
Ожидание / Waiting	Ожидание входящей комплектации от поставщика. Ожидание утвержденной документации от конструктора / Waiting for incoming components from the supplier. Waiting for approved documentation from the designer	Потери на простои занимали до 10 % от общего времени. В случае работы с приготовлением заделов сборок это приводило к потере перепроизводства и запасов / Downtime losses accounted for up to 10% of the total time. In the case of pre-production work, this resulted in the loss of overproduction and inventory
Переделка / брак / Rework / defects	Доработки за неопытными/ необученными сотрудниками / Rework by inexperienced/untrained employees	Потери времени на доработку сборок занимали около 5 % от общего времени. Потери финансов на неустранимый брак / Time lost due to reworking assemblies accounted for approximately 5% of the total time. Financial losses due to irreparable defects
Нереализованный потенциал / Unrealized potential	Нереализованные инициативы сотрудников производства / Unimplemented initiatives of production employees	Предложения от сотрудников по оптимизации технологии и организации процесса могли бы принести экономию ресурсов / Suggestions from employees for optimizing technology and process organization could have resulted in resource savings

Окончание табл. 1

Table 1 (continued)

Название / Name	Выражение / Expression	Результат / Result
Неоптимальное управление / Suboptimal management	Непрозрачность системы управления ПСЦ на всех рабочих местах, дисбаланс производства, неритмичность выполнения плана / Lack of transparency in the production process management system across all workstations, production imbalances, and irregular plan fulfillment	Потери времени линейных руководителей до 30 % от общего на разбор ситуации и понимание стадии на каждом рабочем месте, ручная балансировка и постоянные отклонения от плана / Line managers lost up to 30% of their total time due to situation analysis and understanding of the stage at each workstation, manual balancing, and constant deviations from the plan

До реализации проекта по БП в цехе сборки БПЛА было реализовано стапельное производство, то есть один работник выполняет все этапы сборки полностью самостоятельно. В конце одного рабочего дня цех выпускал в среднем 66 изделий, что не обеспечивало необходимое количество для закрытия заказа в определенный срок. Для своевременного выполнения заказа требовалось выпускать 330 изделий ежедневно, но процент выполнения плана на момент обследования фактического состояния процесса сборки БПЛА составлял 20 %. Такой результат не позволял сохранить процесс работы без изменений, поэтому было принято решение о совершенствовании процесса.

В рамках обследования цеха с помощью методов БП (картирование потока создания ценности, фотография рабочего дня и диаграмма перемещений) были выявлены узкие места процесса сборки БПЛА. На 15 последовательных операций приходилось 16 видов различного рода потерь, наиболее значимые из которых – ожидания, ненужная транспортировка и брак. Например, чтобы приступить к сборке, оператор вынужден был отправиться на поиск необходимых комплектующих и инструментов, на этапах производства заниматься перекладкой и передачей сборки дальше по потоку, осуществлять доработку выявленных несоответствий после облета – всё это создавало потери и не позволяло процессу двигаться сбалансированно и выполнить план в срок.

Построение целевого состояния

В рамках развития направления по разработке и производству БПЛА на Обуховском заводе запу-

щен проект по организации потока создания ценности БПЛА на принципах БП, производимых в сборочно-монтажном цехе. При переходе к целевому состоянию был налажен процесс обеспечения комплектации цеха, организованы пункты межоперационного хранения (буферы). С целью равномерного распределения по потоку сборочно-монтажных работ производственный процесс был разделен на простые операции по технологическому процессу. На основании этого были созданы 18 сборочно-монтажных постов, каждый из которых выполнял установленные технологическим процессом операции за определенное количество времени. В построении нового производства учтены имеющиеся ранее потери на перемещение и транспортировки, которые были полностью устранены за счет новой организации. Благодаря построению поточной модели производства операции были распараллелены, и запуск операционного цикла каждого поста начинался с подготовленной заранее комплектации и подборов, что позволило в целом сократить время протекания процесса. Как подчеркивается в классических работах по бережливому производству, переход от стапельной сборки к поточной организации является ключевым условием снижения потерь и повышения ритмичности процесса [5, 6]. В соответствии с ГОСТ Р 56020–2020 поточная линия должна обеспечивать синхронизацию операций и минимизацию межоперационных запасов.

Фрагменты фактического и целевого состояния процесса сборки БПЛА в нотации BPMN представлены на рисунке 1.

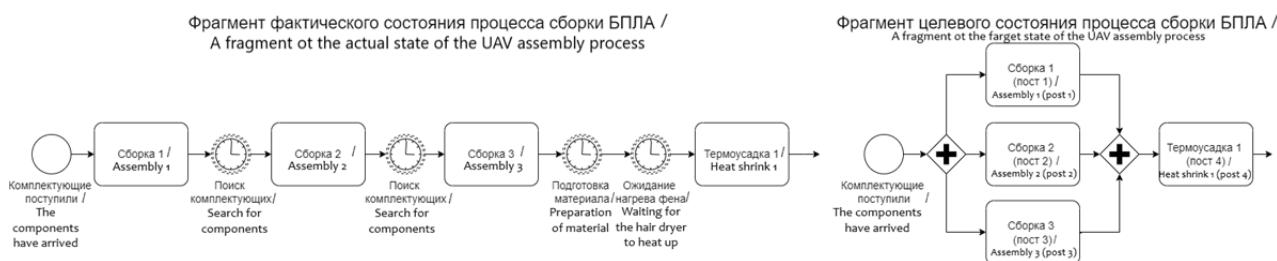


Рис. 1. Фрагменты процесса сборки БПЛА

Fig. 1. Fragments of the UAV assembly process

Когда процесс был разделен на операции согласно технологическому процессу, для анализа целевого состояния была построена имитационная модель цеха сборки, работающая в реальном времени в программе AnyLogic [7]. AnyLogic – специализирован-

ное российское программное обеспечение для моделирования различных процессов и систем. Российская разработка AnyLogic подпадает под закон об импортозамещении продукции и снижает риски, связанные с возможным отсутствием поддержки со сто-

роны зарубежных поставщиков. Как отмечено в работах по цифровому моделированию производственных систем, применение имитационных моделей позволяет не только прогнозировать поведение системы, но и проводить оптимизацию параметров до внедрения изменений в реальную среду, что существенно снижает риски и затраты [8, 9]. В условиях ограниченных ресурсов и высокой вариабельности спроса такие модели становятся основой для построения цифровых двойников производственных процессов [10].

Цель моделирования работы цеха в программе AnyLogic – выяснить оптимальное количество необходимых работников, задействованных для сборки на каждом посту. С помощью построения имитационной модели можно описать все процессы, происходящие в системе, задать законы их работы и взаимодействие отдельных частей и получить быстрый результат относительно различных параметров. Вычислительные эксперименты позволяют сделать выводы о значениях параметров, при которых система работает максимально эффективно, минимизировать простои и сократить потери [11].

Разработка имитационной модели

Исходя из постановки задачи и потока создания ценности, в процессе разработки модели использовались агентная и дискретно-событийная методологии. Агент – элемент системы, который действует в системе по заданным правилам. Данный элемент взаимодействует с системой, в результате чего изменяет-

ся его состояние или он сам. Дискретно-событийная методология позволяет представить систему в виде процесса, то есть последовательности операций [12]. При построении процессорной диаграммы в среде AnyLogic ей были присвоены следующие входные параметры.

Время выполнения работы каждого поста, выраженное в минутах. Распределено по треугольному закону: со средним значением, минимальным и максимальным.

Треугольный закон распределения [13] используется в данном исследовании, поскольку информация о времени протекания каждой операции ограничена только собранными данными фотографии рабочего дня. И имеющийся объем недостаточен для статистически значимого подтверждения специфических распределений (нормального и др.). Также треугольное распределение позволяет эффективно задать границы, что минимизирует риск появления нереалистичных значений в ходе имитации.

Гистограммы замеренного времени первых четырех постов представлены на рисунке 2. Треугольный закон распределения замерен и совпадает при уровне значимости для всех постов. Для иллюстрации приведены 1–4-й посты. На оси абсцисс откладывается время выполнения операции на посту в минутах, на оси ординат – количество такого замеренного времени. Также на графике для каждого поста линией задан теоретический вид треугольного распределения.

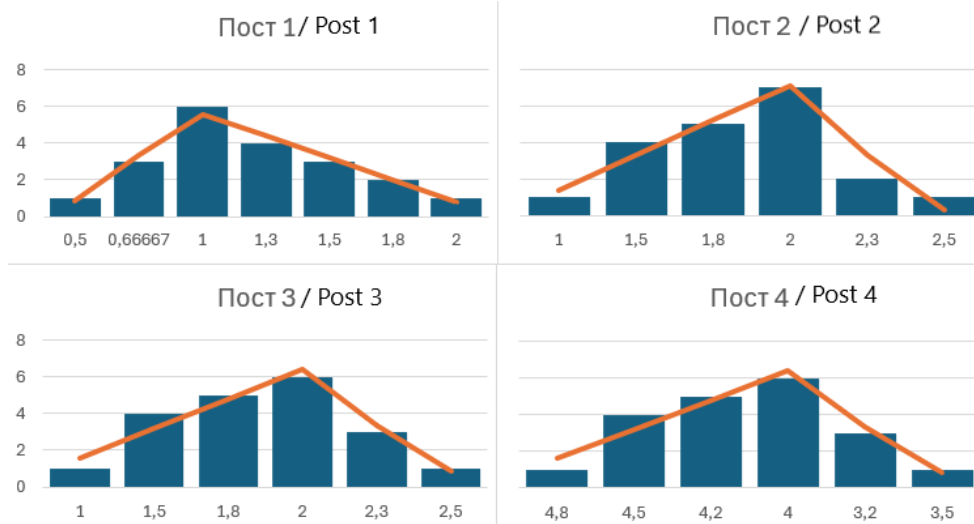


Рис. 2. Гистограммы замеренного времени первых четырех постов

Fig. 2. Histograms of the verified time of the first four stations

Был исследован гипотетический закон о том, что распределение подчинено треугольному закону. На уровне значимости 0,05 была проверена гипотеза о том, что генеральная совокупность распределена по треугольному закону.

Количество ресурсов – 60 работников, поскольку остальные работники стали задействованы в процессе подготовки комплектующих и координации работы цеха.

Время выполнение модели – 1 рабочий день с 7:00 до 15:00.

При построении модели цеха сборки использовались элементы библиотеки моделирования процессов среды AnyLogic:

- блок имитации поступления комплектующих в цех;
- блок работы поста, для которого в свойствах модели было задано время, выраженное в минутах

и распределенное по треугольному закону. Также блок захватывает для агента нужное количество ресурсов;

- блок имитации работников цеха сборки (сборщики, монтажники, настройщики);
- блок завершения, когда сборка выполнена, изделие собрано.

Для первичного анализа модели необходимо было задать количество рабочих мест для каждого поста. В процессе сборки БПЛА пост – это место, где выполняется определенная операция по технологическому процессу. Так как посты имеют разную трудоемкость, для каждого из них были введены рабо-

чие места исходя из времени такта процесса, которое равно 1,2 минуты. Время такта – время, необходимое для завершения одного цикла работы процесса. В данном исследовании оно рассчитывается как отношение времени одного рабочего дня к количеству изделий, которые необходимо выпускать ежедневно. Оптимальное распределение количества рабочих мест было определено исходя из времени такта. Данное решение позволяет выровнять процесс, предотвращая скопление комплектаций на пунктах жероперационного хранения. Впервые модель была запущена согласно схеме распределения рабочих мест для каждого поста, представленной в таблице 2.

Таблица 2. Распределение рабочих мест на каждый пост

Table 2. Distribution of workstations at each station

Номер поста / Post number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Рабочее место, шт. / Work place, pcs.	1	2	2	4	2	4	3	3	2	2	5	4	3	1	15	3	2	2

После первого запуска стало понятно, сколько потребуется комплектующих на каждый пост ежедневно, поэтому в свойствах блока имитации указано количество поступающих комплектующих – 500 в один

рабочий день. Это обеспечивает необходимый ежедневный результат цеха и позволяет подготовить детали заблаговременно. Готовая имитационная модель в AnyLogic представлена на рисунке 3.

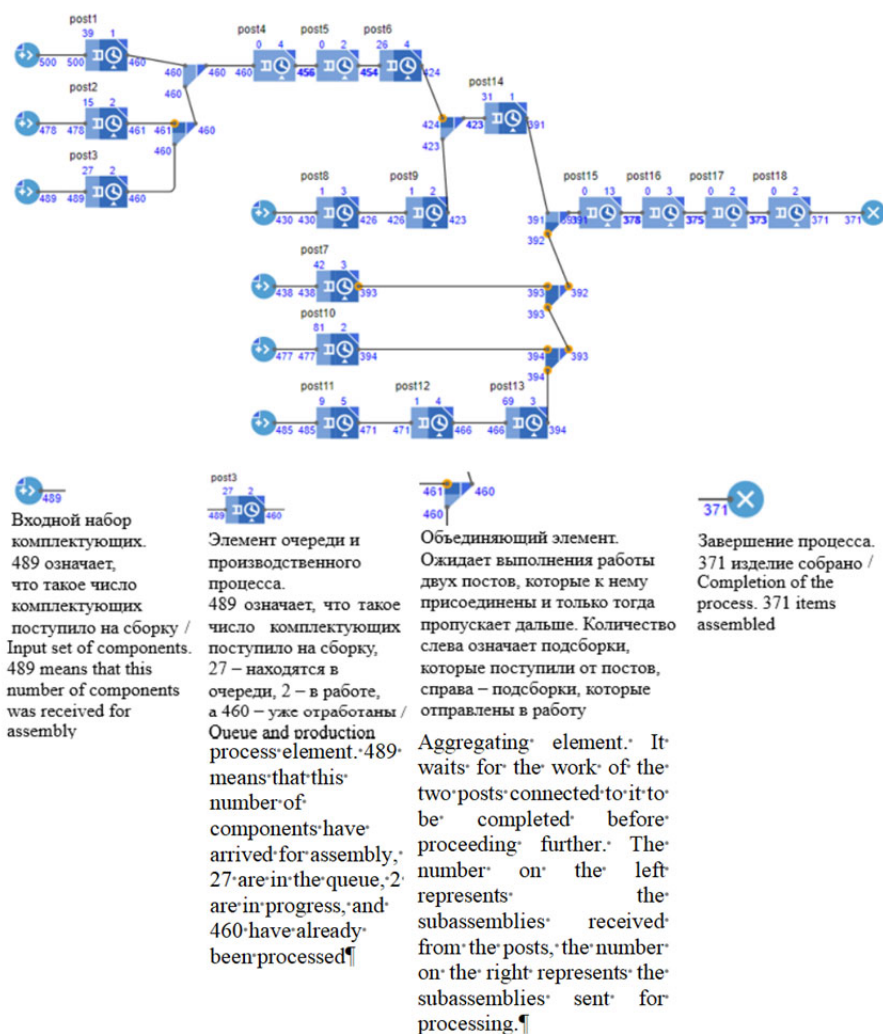


Рис. 3. Имитационная модель процесса сборки БПЛА

Fig. 3. Simulation model of the UAV assembly process

Анализируя результаты моделирования, видим, что при таком распределении рабочих мест по окончании трудового дня получаем 371 изделие. Данный результат выполняет условие плана на сборку. По мере работы модели образуются небольшие очереди, это можно увидеть, например, на посту № 14. В очереди находится 31 подсорка, то есть пост оснащен изделиями, которые поступили от предыдущих операций. В данном исследовании это говорит о том, что работники обеспечены комплектующими всегда. А объединяющий элемент справа от поста № 2 ожидает подсорку от поста № 3, поэтому возникает очередь, так как сборка от поста № 2 уже подоспела, а от поста № 3 ещё нет. Но обращая внимание на график загрузки ресурсов на постах, мы видим, что работники практически полностью загружены в течение дня (рис. 4).

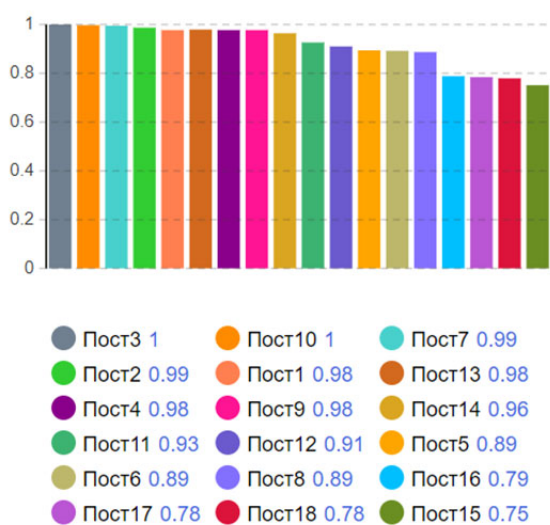


Рис. 4. Загрузка ресурсов на постах

Fig. 4. Resource loading at stations

В действительности максимальная загрузка некоторых постов подтверждает вывод о том, что в таких условиях пост перегружен, он работает на пределе возможностей, работники не могут оторваться от сборки ни на минуту в течение рабочего дня. Около 50 % всех сотрудников цеха имеют резерв времени. Эти 60 минут они могут использовать для вспомогательных работ, на совершенствование процесса, обучение. Также следует отметить неравномерность загрузки постов. Чтобы поток создания ценности был наиболее результативен, нужно стремиться к выравниванию загрузки постов балансированием рабочих мест, поэтому стоит оптимизировать данные результаты. Избыточная загрузка отдельных постов является классическим признаком несбалансированности потока, что ведет к накоплению незавершенного производства и снижению общей производительности системы [14]. В соответствии с методологией картирования потока создания ценности выравнивание загрузки рабочих мест – один из ключевых этапов перехода к целевому состоянию [15].

Оптимизация имитационной модели

Следующим шагом проводилась серия оптимизационных экспериментов в среде AnyLogic для выявления оптимального количества рабочих мест. Процесс поиска наилучшего решения был осуществлен с помощью встроенного оптимизатора, который в автоматическом режиме проводит подбор параметров и проверяет различные сочетания.

Целевая функция выражалась в количестве выпущенных изделий и стремилась к максимизации. В свойствах эксперимента были заданы следующие требования:

1. На выходе количество изделий не должно быть меньше 330 шт.

2. Количество ресурсов, задействованных в системе, не должно превышать 60 человек.

Были проведены эксперименты для двух групп параметров модели, значениями параметров выступали рабочие места.

Первая группа – посты 1–3, 7, 8, 10, 11, которые получают наибольшую нагрузку. Именно от них зависит, насколько быстро и качественно процесс продвинется дальше.

Вторая группа – посты 15–18 второй очереди.

При запуске эксперимента значения параметров варьировались. Результаты экспериментов представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты экспериментов

Table 3. Experiment results

№ эксперимента / Experiment no.	Группа, которая изменялась в эксперименте / The group that changed in the experiment	Результат, шт. / Result, pcs.
1	Первая группа / First group	381
2	Первая группа / First group	379
3	Первая группа / First group	378
4	Вторая группа / Second group	376
5	Вторая группа / Second group	379
6	Вторая группа / Second group	382

Из результатов экспериментов следует, что целесообразно изменить значение параметров модели согласно эксперименту № 6 – он показывает лучший результат. То есть изменится количество работников на постах 15 и 17 с 15 человек на 13 и с 2 на 3 соответственно. В данном эксперименте среда, автоматически изменяя значения второй группы постов, подбирает оптимальные величины и сразу же выдает результат потока создания ценности (рис. 5). График свидетельствует, что значения не противоречат заданным требованиям эксперимента оптимизации.

Для фильтрации стохастического шума, характерного для дискретно-событийного моделирования, было задано около 15 экспериментов для каждой

группы. Это позволило оценить не точечное значение целевой функции, а ее математическое ожидание, что важно для обеспечения устойчивости найденного решения.

При запуске модели с предложенными значениями результат увеличился на 11 изделий, но также увеличилась загрузка ресурсов. Поэтому были проведены эксперименты со снижением количества прибывающих комплектующих, но при соблюдении выполнения ежедневного плана цеха. Оптимальной

величиной комплектующих, поступающих на посты первой очереди, оказалась 430 штук. В результате имитационная модель показала 377 изделий в день, и загрузка постов выглядит равномернее и менее перегруженной. Также удалось высвободить ресурс двух работников цеха. Для сравнения полученных результатов графики загрузки ресурсов до внесенных изменений и после представлены на рисунке 6. После внесенных изменений уже 70 % работников цеха имели временной резерв.

test3 : Optimization

	Текущее	Лучшее
Итерация: / Iteration	24	24
Функционал: / functional	382	382
Параметры: / Parameters	Copy best	
post1_par	1	1
post2_par	2	2
post3_par	2	2
post4_par	3	3
post5_par	2	2
post6_par	4	4
post7_par	3	3
post8_par	3	3
post9_par	2	2
post10_par	2	2
post11_par	5	5
post12_par	4	4
post13_par	3	3
post14_par	1	1
post15_par	13	13
post16_par	3	3
post17_par	3	3
post18_par	2	2

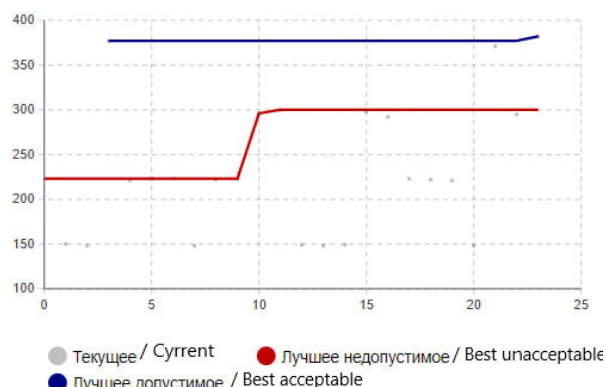


Рис. 5. Результат шестого эксперимента

Fig. 5. Results of the sixth experiment

Среднее значение процента загрузки постов до оптимизации параметров составляло 92 %, после – 87 %. Цех сократил процент нагрузки, не теряя результата.

До внесенных изменений дисперсия равна 0,007, после – 0,004. В данном исследовании уменьшение дисперсии свидетельствует о положительной закономерности, поскольку разброс между значениями относительно среднего сократился. Большее количество работников стали приближены к 80%-й загрузке, что свидетельствует об увеличении свободного временного резерва цеха сборки.

В результате работы имитационной модели было принято решение изменить количество рабочих мест

согласно эксперименту № 6 и в свойствах блока имитации поступления комплектующих в цех указать оптимальное количество комплектующих – 430 шт. в один рабочий день. Модель основана на идеальном состоянии, когда отсутствуют проблемы, внешние факторы воздействия исключены и цех оснащен комплектующими всегда и максимально загружен. Время выполнения операции усреднено в соответствии с тем, что работники выполняют сборку согласно среднестатистической физиологической моторике людей, то есть чем выше опыт, квалификация, тем быстрее будет выполняться работа.

Полученные резервы свободного времени будут задействованы на вспомогательные работы: в тече-

ние рабочего процесса может возникнуть потребность в применении изменений конструкторской документации, технологических процессах, оформ-

лении предложений по совершенствованию процесса. С целью перераспределения загрузки ресурсов может быть увеличено количество работников цеха.

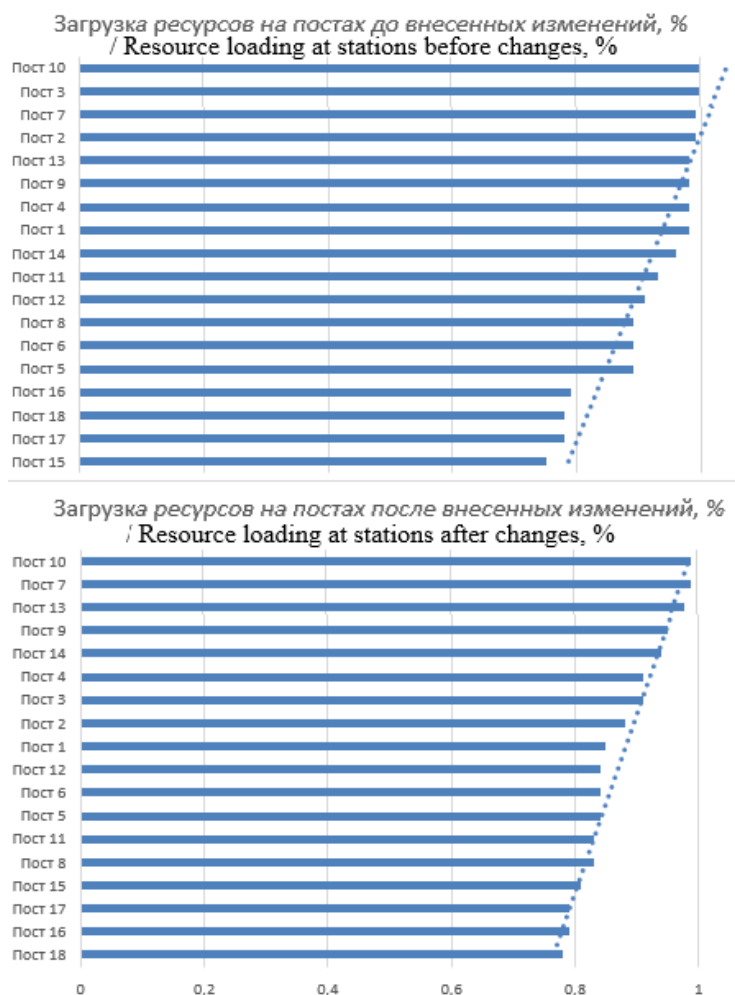


Рис. 6. Загрузка ресурсов на постах до внесенных изменений (сверху) и после (снизу)

Fig. 6. Resource loading at stations before (top) and after (bottom) changes

Реализация изменений процесса сборки БПЛА

Работа по результатам моделирования потока создания ценности позволила быстро найти оптимальный путь построения целевой модели и реализовать его на практике. Также подтвердилось, что работа, организованная по принципу поточного производства, дает значимые результаты и существенно повышает эффективность работы в массовом производстве.

Изначально был построен план перехода от текущего состояния к целевому, который включал в себя следующие основные этапы:

1. Трансформация планировки цеха и технологического процесса сборки.
2. Распределение постов за каждым рабочим местом на основе данных времени такта и результатов имитационного моделирования.
3. Обеспечение постов инструментом и оборудованием, исходя из технологического процесса.
4. Внедрение методов БП – стандартизация и визуализация по операциям постовых групп.

5. Обеспечение специальной технологической оснасткой.

6. Построение матрицы компетенций сотрудников и распределение по постам.

7. Обучение рабочих операциям (до идеала) и работе по времени такта.

8. Обеспечение комплектацией постовые группы исходя из расчетных данных имитационной модели.

9. Создание движения и передачи по времени такта, создание ритма.

10. Внедрение метода БП – организация рабочих пространств 5С.

Реализация данных мероприятий позволила настроить процесс согласно имитационной модели с учетом большинства рисков отставания и создания буферных зон для непредвиденных моментов.

Производственный процесс сборки был разделен на простые операции, для которых были визуализированы стандарты работы, что позволило снизить трудоемкость отдельных операций и минимизиро-

вать ошибки при сборке. После изучения статистики отказов при настройке и облетах акцент стандартизации был реализован на методах БП – защита от непреднамеренных ошибок и встроенное качество в процесс.

Создана поточная линия с последовательным расположением сборочных постов в соответствии с технологическим процессом, где рабочие осуществляют операции поочередно, а элементы сборки переходят от одной операции к другой с минимальными потерями. Налажен процесс комплектации и организованы пункты межоперационного хранения. Участок цеха был поделен на зоны с ответственными бригадами, которые следят за обеспеченностью рабочих мест инструментом и комплектующими.

С целью ускорения внедрения технологической оснастки в сборочно-монтажные процессы была реализована современная система параллельного проектирования и изготовления на FDM-принтерах «Гелиос-1» производства Обуховского завода. 3D-печать позволила в течение нескольких часов получить опытный образец оснастки и испытать его на технологичность и эффективность внедрения в основной процесс. Помимо ускорения времени технологической оснастки позволяет сократить ошибки при сборке, минимизируя человеческий фактор [16].

Командная работа представителей конструкторов, технологов производства и сотрудников отдела организационного развития стала основой результативной организации производства, что позволило получить необходимый результат, устранить большую часть потерь по таблице 1 и увеличить эффективность процесса. Такой межфункциональный подход является неотъемлемой частью концепции «Бережливое производство и Индустрия 4.0», где цифровые технологии и организационные изменения взаимно усиливают друг друга [17]. Важную роль в этом процессе играет обучение персонала и вовлечение сотрудников в непрерывное совершенствование процессов. Достигнутый результат по производительности труда вырос в 5 раз по сравнению с началом проекта и с учетом неизменности количества ранее задействованного ранее персонала.

Исходя из того, что улучшение временных характеристик потока создания ценности и устранение потерь позволило увеличить объем производства в единицу времени под установленный объем спроса, реальным финансово-экономическим результатом можно считать увеличение прибыли, которую АО «НПО «Обуховский завод» может получить за фиксированный временной период. Финансово-экономический результат в размере 31,6 млн руб., связанный с устранением/снижением затрат, вызванных потерями, возник в результате:

- 1) проведения аналитической работы по функционированию процесса сборочно-монтажных операций для производства БПЛА;
- 2) упорядочивания расположения сборочных постов;
- 3) определения количества рабочих мест на каждом сборочном посту исходя из цикла каждой операции;

4) установки целевого показателя минимального объема выпуска продукции в день исходя из 8-часового рабочего дня;

5) стандартизации сборочных постов;

6) визуализации основных сборок;

7) организации своевременных поставок, комплектующих на сборочные посты;

8) обучения сотрудников операциям на сборочных постах [18].

Направления развития в контексте бережливого роботизированного производства (БРП)

Проведенная оптимизация позволила создать ритмичный поточный процесс, однако отдельные операции остаются человекозависимыми и содержат резервы для дальнейшей автоматизации. В соответствии с разработанной в исследовании методикой организации бережливого роботизированного производства (БРП) определены следующие направления развития.

Роботизация межоперационной логистики

В текущей модели перемещение комплектующих между постами 6–10 и 14–18 выполняется вручную. Потери на транспортировку составляют до 12 % от общего времени цикла. Предлагается внедрение автоматических транспортных средств (AGV) с лазерной навигацией, что позволит:

- сократить время транспортировки на 40 %;
- снизить число перемещений персонала на 25 %;
- интегрировать AGV с имитационной моделью

AnyLogic в реальном времени.

Управление буферными зонами

как инструмент минимизации потерь

Моделирование выявило наличие избыточных межоперационных заделов на постах 14 и 16 (очереди до 31-й под сборки). Для снижения связывания оборотных средств предложены:

- алгоритм бесступенчатого регулирования буферных зон (емкость буфера динамически изменяется в зависимости от загрузки последующего поста);
- нормирование максимального уровня запаса не более 5 изделий на пост;
- визуализация буферов (андон-система при превышении 80 % емкости).

Расчетный эффект: сокращение незавершенного производства на 22 %, снижение времени протекания цикла на 18 %.

Контроль шумовых эмиссий

на роботизируемых участках

При планируемом внедрении AGV и автоматических манипуляторов уровень шума в зоне постов 1–4 может возрасти до 85...90 дБ(А), что превышает нормативы (СанПиН 1.2.3685–21). Разработаны требования:

- ограничение скорости соударения элементов роботов до 0,15 м/с;
- применение вибродемпфирующих покрытий буферных зон;
- включение шумовых характеристик в качественную модель оценки потерь (коэффициент шумового загрязнения $K_{ш}$).

Квалиметрическая оценка готовности к роботизации

На основе методики БРП проведена оценка потенциала устранения потерь средствами роботизации ($P_{роб}$) для каждого поста (табл. 4).

Матрица приоритизации подтвердила целесообразность роботизации логистики и буферных зон в первую очередь.

Таблица 4. Оценка потенциала устранения потерь
Table 4. Assessment of the potential for eliminating losses

Пост / Post	Основные потери / Major losses	$P_{роб}$	Рекомендация / Recommendation
2	Ожидание, брак / Waiting	0,82	Приоритетная роботизация / Priority robotics
11	Транспортировка / Transportation	0,76	Целесообразна AGV / Feasible
14	Избыточный запас / Excess inventory	0,71	Автоматический буфер / Automatic buffer
15	Излишняя обработка / Excessive processing	0,45	Организационные улучшения / Organizational improvements

Выводы

Реализация проекта на базе АО «НПО «Обуховский завод» показала, что сочетание методов бережливого производства (VSM, 5C, стандартизация) и имитационного моделирования в среде AnyLogic позволяет в 5,7 раза повысить выпуск БПЛА без увеличения численности персонала. Экономический эффект составил 31,6 млн руб. за счет устранения потерь.

Для развития результатов предложены направления перехода к БРП:

- автоматизация транспортировки (AGV);
- интеллектуальное управление буферными зонами;
- контроль шумовых эмиссий;
- квалиметрическая оценка приоритетов роботизации.

Разработанные подходы соответствуют задачам повышения производительности труда и импортозамещения в ОПК и рекомендуются к тиражированию на предприятиях, выпускающих высокотехнологичную продукцию двойного назначения.

Библиографические ссылки

1. Развитие производства гражданской продукции на предприятиях оборонно-промышленного комплекса: монография / Д. К. Щеглов [и др.] М.: АйТи Сервис, 2021. 163 с.
2. Давыдова Н. С. Бережливое производство: монография. Ижевск: Изд-во Института экономики и управления УдГУ, 2012. 138 с.
3. Шалина И. С. Организационно-экономическое и техническое совершенствование производственного процесса в условиях бережливого менеджмента // Технологические инновации и научные открытия: сборник трудов по материалам IV Международного конкурса научно-исследовательских работ (Уфа, 10 февраля 2021 г.). Уфа: Вестник науки, 2020.
4. Жумашева Б. К., Акимов С. С. Развитие и применение карт потока создания ценностей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2022. № 44. С. 118–150. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.4.07

Подобные подходы согласуются с современными тенденциями интеллектуализации производственных систем, где управление ресурсами осуществляется на основе предиктивной аналитики и адаптивных алгоритмов. В перспективе возможно создание полноценного цифрового двойника сборочного цеха, интегрированного с ERP- и MES-системами предприятия для сквозного управления производственными процессами [19, 20].

5. Вумек Дж., Джонс Д. Бережливое производство: как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании. М.: Альпина Паблишер, 2020. 472 с.

6. Лайкер Дж. Дао Toyota: 14 принципов менеджмента ведущей компании мира. М.: Альпина Бизнес Букс, 2021. 400 с.

7. Богинский А. И., Чурсин А. А. Цифровые модели для оптимизации производственно-технологических процессов // Вестник машиностроения. 2020. № 2. С. 63–67.

8. Имитационное моделирование производственных процессов различных типов машиностроительных производств / С. Н. Григорьев, В. А. Долгов, П. А. Никишечкин [и др.] // Вестник МГТУ имени Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2022. № 3 (142). С. 84–99. DOI: 10.18698/0236-2022-3-84-99

9. Шрайбер Т. Дж. Моделирование и имитация производственных процессов. М.: ИНФРА-М, 2023. 288 с.

10. Гаврилов С. В. Управление производственными системами на основе цифровых двойников // Проблемы теории и практики управления. 2022. С. 10–25.

11. Имитационное моделирование производственных процессов различных типов машиностроительных производств / С. Н. Григорьев, В. А. Долгов, П. А. Никишечкин, С. С. Ивашин, Н. В. Долгов // Вестник МГТУ имени Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2022. № 3 (142). С. 84–99.

12. Царев М. В., Андреев Ю. С. Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. № 7. С. 517–531. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531

13. Forbes C., Evans M., Hastings N., Peacock B. (1993) Statistical Distributions. New York: Wiley Publishing, 221 p.

14. Данилов А. Д. Модели для автоматизированного проектирования поточных производств // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Экономика и управление. 2009. № 6. С. 123–129.

15. Шилов Н., Ермолаев В. Методологические основы интеллектуальной поддержки социально ориентированных решений в гибких транспортных системах // Научный вестник ИГТУ. 2016. № 3 (64). С. 59–72.

16. Андреев И. А. Опыт внедрения бережливого производства в оборонной промышленности // Вестник концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2017. № 3. С. 27–36.

17. Belhadi A., Zkik K., Cherrafi A. [et al.] (2022) Lean manufacturing and Industry 4.0 integration: a systematic re-

view. *International Journal of Production Research*, vol. 60, no. 1, pp. 222–245.

18. Андреев И. А. Обучение персонала принципам бережливого производства в системе дистанционного обучения на предприятии оборонно-промышленного комплекса // Вестник концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2021. № 1. С. 8–21.

19. Саханова Т. С., Исмаилов Т. Ш., Тихонов В. А. Цифровой двойник производства как этап новой цифровой бизнес-модели промышленного предприятия // Горная промышленность. 2023. № 2. С. 62–68. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-2-62-68

20. Кузнецова Е. С., Щеглов Д. К. Адаптивная система управления запасами предприятия на основе цифровых двойников и предиктивной аналитики // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2025. Т. 28, № 4. С. 56–63. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-4-56-63

References

1. Shcheglov D.K. [et al.]. (2021) [Development of civilian production at enterprises of the defense-industrial complex]. Moscow: IT Service Publishing, 163 p. (in Russ.).

2. Davydova N.S. (2012) [Lean production]. Izhevsk: Publishing house of the Institute of Economics and Management, 8 p. (in Russ.).

3. Shalina I.S. (2021) [Organizational, economic and technical improvement of the production process in the context of lean management. Technological innovations and scientific discoveries: collection of works based on the materials of the IV International: Competition of scientific research works] (Ufa, February 10, 2021). Ufa: Scientific Publishing Center Bulletin of Science, 2021 (in Russ.).

4. Zhumasheva B.K., Akimov S.S. (2022) [Development and Application of Value Stream Maps]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informacionnye tekhnologii, sistemy upravleniya*, no. 44, pp. 118-150. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.4.07 (in Russ.).

5. Womack J., Jones D. (2020) [Lean Manufacturing: How to Eliminate Waste and Achieve Prosperity in Your Company]. Moscow: Alpina Publisher, 472 p. (in Russ.).

6. Liker J. (2021) [The Toyota Way: 14 Management Principles of the World's Leading Company]. Moscow: Alpina Business Books Publishing, 400 p. (in Russ.).

7. Boginsky A.I., Chursin A.A. (2020) [Digital models for optimization of production and technological processes]. *Vestnik mashinostroeniya*, no. 2, pp. 63-67 (in Russ.).

8. Grigoriev S.N., Dolgov V.A., Nikishechkin P.A. [et al.] (2022) [Simulation modeling of production processes of vari-

ous types of mechanical engineering industries]. *Vestnik MGTU imeni N. E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie*, no. 3 (142), pp. 84-99 (in Russ.).

9. Schreiber T.J. (2023) [Modeling and simulation of production processes]. Moscow: INFRA-M Publishing, 288 p. (in Russ.).

10. Gavrilov S.V. (2022) [Management of production systems based on digital twins]. Ekaterinburg: Problems of Management Theory and Practice Publishing, pp. 10-25 (in Russ.).

11. Grigoriev S.N., Dolgov V.A., Nikishechkin P.A., Ivashin S.S., Dolgov N.V. (2022) [Simulation Modeling of Production Processes of Various Types of Mechanical Engineering Production]. *Vestnik MGTU imeni N. E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie*, no. 3 (142), pp. 84-99 (in Russ.).

12. Tsarev M.V., Andreev Yu.S. (2021) [Digital Twins in Industry: History of Development, Classification, Technologies, and Use Scenarios]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Priborostroenie*, no. 7, pp. 517-531. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531 (in Russ.).

13. Forbes C., Evans M., Hastings N., Peacock B. (1993) *Statistical Distributions*. New York : Wiley Publishing, 221 p.

14. Danilov A.D. (2009) [Models for automated design of flow production]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika i upravlenie*, no. 6, pp. 123-129 (in Russ.).

15. Shilov N., Ermolaev V. (2016) [Methodological Foundations of Intelligent Support of Socially-Oriented Decisions in Flexible Transport Systems]. *Nauchnyy vestnik NGTU*, no. 3 (64), pp. 59-72 (in Russ.).

16. Andreev I.A. (2017) [Experience of implementing lean manufacturing in the defense industry]. *Vestnik Koncerna VKO «Almaz-Antej»*, no. 3, pp. 27-36 (in Russ.).

17. Belhadi A., Zkik K., Cherrafi A. [et al.] (2022) Lean manufacturing and industry 4.0 integration: a systematic review. *International Journal of Production Research*, vol. 60, no. 1, pp. 222-245.

18. Andreev I.A. (2021) [Personnel training in lean manufacturing principles in the distance learning system at an enterprise of the defense-industrial complex]. *Vestnik Koncerna VKO «Almaz-Antej»*, no. 1, pp. 8-21 (in Russ.).

19. Sakhapova T.S., Ismagilov T.Sh., Tikhonov V.A. (2023) [Digital twin of production as a stage of a new digital business model of an industrial enterprise]. *Gornaya promyshlennost'*, no. 2, pp. 62-68. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-2-62-68 (in Russ.).

20. Kuznetsova E.S., Shcheglov D.K. (2025). [Adaptive inventory management system of an enterprise based on digital twins and predictive analytics]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, vol. 28, no. (4), pp. 56-63. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-4-56-63 (in Russ.).

Value Stream Optimization in UAV Assembly Based on the Integration of Lean Manufacturing, Simulation Modeling and Elements of Robotics

I.A. Andreev, North Western Regional Center of “Almaz-Antey” Concern - “Obukhovsky Plant”, St. Petersburg, Russia

E.V. Yashikhina, North Western Regional Center of “Almaz-Antey” Concern - “Obukhovsky Plant”, St. Petersburg, Russia

This article presents the results of optimizing the series assembly process of unmanned aerial vehicles (UAVs) at a defense industry enterprise using lean manufacturing tools and simulation modeling in the Any Logic environment. Using value stream mapping, timekeeping, and a workday photograph, the main types of losses were identified and quantified, including waiting time, unnecessary transportation, defects, and inefficient personnel movements. A simulation model was developed that justified the transition from a slipway to a flow assembly organization, dividing the process into 18 sequential stations. Computational experiments determined the optimal number of workposts at each station, which increased daily output 5.7-fold without increasing the headcount, reduced worker workload variance from 0.007 to 0.004, and created an employee float of 70%. The economic effect of eliminating losses amounted to 31.6 million rubles. Building on the obtained results, we propose approaches to transitioning to lean robotic manufacturing, including the automation of interoperational logistics using automated guided vehicles, the implementation of algorithms for continuously variable buffer zone control to minimize work-in-progress, noise emission monitoring in robotized

areas, and a qualimetric assessment of robotization priorities based on operational coefficients. The developed approaches can be replicated at defense industry enterprises for organizing multi-product, continuous assembly of high-tech products.

Keywords: lean manufacturing, simulation modeling, AnyLogic, UAV, value stream, waste, robotics, buffer zones, qualimetry, DIC.

Получено 28.05.2026

Образец цитирования

Андреев И. А., Яшихина Е. В. Оптимизация потока создания ценности при сборке БПЛА на основе интеграции бережливого производства, имитационного моделирования и элементов роботизации // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2026. Т. 29, № 3. С. 33–44. DOI: 10.22213/2413-1172-2026-3-33-44

For Citation

Andreev I.A., Yashikhina E.V. (2026) [Value Stream Optimization in UAV Assembly Based on the Integration of Lean Manufacturing, Simulation Modeling and Elements of Robotics]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 29, no. 2, pp. 33-44. DOI: 10.22213/2413-1172-2026-3-33-44 (in Russ.).