

УДК 004.02+658.58

DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_17
EDN CQRUXC

УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКАМИ ЗАДАНИЙ РЕМОНТНЫХ БРИГАД В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГРАФИКА ОБСЛУЖИВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

М.А. НасоновORCID: 0000-0002-0200-8271 e-mail: ma.nasonov@sintez-oka.ru

Группа компаний «Синтез-ОКА»

*Дзержинск, Россия***С.А. Манцеров**ORCID: 0000-0001-8458-8259 e-mail: mca_9@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, Россия

Представлен новый подход к управлению потоками заданий ремонтных бригад на основе адаптации принципов *Workload Control* к системе технического обслуживания и ремонтов оборудования промышленного предприятия. Предложен алгоритм замкнутого цикла распределения заданий, включающий контроль допуска, балансировку загрузки и динамическое перераспределение работ при изменении условий. В алгоритм интегрированы правила диспетчеризации и механизм анализа отклонений, что обеспечивает адаптивность к поступлению срочных и внеплановых заявок. Формализована структура исходных данных, определены входные и выходные параметры, разработан псевдокод и набор метрик для оценки эффективности. Экспериментальная проверка на тестовом наборе данных, имитирующем реальные условия производственного подразделения, подтвердила работоспособность метода и его применимость при ограниченных ресурсах. Результаты демонстрируют потенциал интеграции алгоритма в информационные системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) для повышения устойчивости планирования и равномерности загрузки ремонтных бригад.

Ключевые слова: управление загрузкой; планирование заданий; балансировка загрузки; диспетчеризация; адаптивный алгоритм.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Насонов, М.А. Управление потоками заданий ремонтных бригад в условиях изменчивости графика обслуживания оборудования / М.А. Насонов, С.А. Манцеров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2026. № 1. С. 17-31. DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_17 EDN: CQRUXC

TASK FLOW MANAGEMENT FOR MAINTENANCE TEAMS UNDER CHANGING EQUIPMENT SERVICE SCHEDULES

M.A. NasonovORCID: 0000-0002-0200-8271 e-mail: ma.nasonov@sintez-oka.ru

Sintez-OKA Group of Companies

*Dzerzhinsk, Russia***S.A. Mantserov**ORCID 0000-0001-8458-8259 e-mail: mca_9@nntu.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

The paper proposes a new approach to managing maintenance team task flows is proposed, adapting the principles of *Workload Control* to the maintenance and repair system of an industrial enterprise. A closed-loop task allocation algorithm was developed, combining admission control, workload balancing and dynamic redistribution of work when conditions change. The algorithm integrates dispatching rules and a deviation analysis mechanism, ensuring

adaptability to urgent and unscheduled requests. The model formalizes the initial data structure, defines input and output parameters, and introduces pseudocode and a set of performance metrics. Experimental verification on a test dataset simulating real conditions of the production unit confirmed the algorithm's feasibility and applicability under resource constraints. The results demonstrate its potential for integration into maintenance and repair information systems to enhance planning stability and ensure balanced workload distribution among maintenance teams.

Keywords: Workload Control; maintenance and repair; task scheduling; load balancing; dispatching; adaptive algorithm.

FOR CITATION: Nasonov M.A., Mantserov S.A. Task flow management for maintenance teams under changing equipment service schedules. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 1. Pp. 17-31.
DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_17 EDN: CQRUXC

Введение

Эффективность производственных процессов на современных промышленных предприятиях в значительной степени определяется надежностью и доступностью оборудования. В этих условиях особое значение приобретает система технического обслуживания и ремонтов (ТОиР), отвечающая как за поддержание технической исправности оборудования, так и за непрерывность технологических потоков [1-3]. Исторически устоявшаяся методика расчета планов-графиков ТОиР оборудования включает процедуру формирования годового и квартального расписания на основе нормативов. Представленная в работе [4] модель демонстрирует наилучшую эффективность в условиях стабильного графика, когда объем внеплановых мероприятий незначителен, а процессы исполнения поддаются предсказуемому регулированию. Однако по мере увеличения количества внеплановых заявок, требующих включения в график ТОиР, система сталкивается с растущими трудностями организации работы ремонтных бригад на уровне оперативного распределения заданий. На практике это приводит к ряду системных проблем, существенно влияющих на производственные показатели. Одной из наиболее заметных из них является неравномерность загрузки ремонтных бригад. Часто планы формируются без учета оперативных изменений, что порождает перегрузку одних исполнителей и вынужденные простои других. Следствием становится рост времени простоев оборудования, так как несвоевременно выполненные работы накапливаются, а отсутствие механизма динамического перераспределения ресурсов не позволяет гибко реагировать на изменение ситуации. Очевидно, что именно жесткая структура графиков, недостаточно адаптированная к оперативным корректировкам, замедляет реакцию на события. В таких условиях возрастает нагрузка на обслуживающий персонал, поскольку большую часть изменений приходится вносить вручную, что сопровождается значительными временными затратами и снижением общей управляемости.

Актуальность перехода к управлению заданиями в условиях быстро меняющихся приоритетов обслуживания оборудования обусловлена необходимостью системной трансформации процессов исполнения заданий ТОиР. Управление должно не только учитывать текущую загрузку, но и обеспечивать гибкое реагирование на изменяющиеся условия производственной обстановки. Это требует таких функциональных характеристик, как способность к минимизации перегрузок и простоев, сокращение времени отклика на внеплановые работы, возможность перераспределения задач в режиме реального времени и интеграция с информационной системой предприятия для автоматизации расчетов и поддержки принятия решений. Цель внедрения механизма управления загрузкой ремонтных бригад заключается в обеспечении устойчивости и непрерывности процессов исполнения мероприятий ТОиР в условиях высокой производственной изменчивости и ограниченности доступных ресурсов.

Методы и материалы исследования

Среди существующих решений для гибкого планирования ТОиР можно выделить модель [5], в которой предложен подход к организации обслуживания на основе алгоритмов целочисленного линейного программирования. Авторы интегрируют техническое обслуживание в производственный график, учитывая доступность оборудования и влияние плановых остановок на выпуск продукции. Такой подход позволяет не только оптимизировать интервалы обслуживания, но и минимизировать производственные потери за счет совместного планирования. Однако, несмотря на высокую точность, подобные модели сложно масштабировать для динамичной среды с ограниченными ресурсами. В работе [6] рассматривается задача построения оптимального расписания профилактического обслуживания, в которой модель учитывает параметры надежности, вероятность отказа, риск незапланированного простоя и стоимость простоев оборудования. Несмотря на высокую степень формализации, подобные модели обладают ограниченной адаптивностью к появлению в графике внеплановых и срочных заданий, не содержащих полной исходной информации о характеристиках надежности (например, о вероятности отказа в конкретных условиях эксплуатации), что усложняет их применение в условиях быстро меняющейся производственной среды.

Подход к динамическому планированию мероприятий ТОиР с учетом реальных условий эксплуатации, включая группировку задач и человеческий фактор, предложен в работе [7]. Авторы рассматривают не только технические параметры, но и влияние утомляемости персонала, вероятность ошибки, а также ограниченность ресурсов обслуживания. Вводится механизм адаптивного перепланирования по скользящему горизонту и агрегирования заданий, направленный на минимизацию затрат и рисков. Однако в такой модели не рассматривается связь с уровнями долгосрочного и краткосрочного планирования проведения мероприятий ТОиР, что делает проблематичным синхронизацию графиков ТОиР и производства на разных уровнях управления. В работе [8] подчеркивается, что большинство существующих моделей ограничены учетом двух из трех ключевых аспектов: производства, технического обслуживания и ресурсов. По мнению авторов, наиболее слабо представлены интегрированные подходы к управлению графиками с учетом ограниченности ремонтных бригад и необходимости согласования с производственными задачами. Исследования классифицируются по уровням интеграции (P-M, P-R, P-M-R), подчеркивается, что реальные организационные ограничения часто остаются вне моделей. Для устранения этого предлагается подход, направленный на частичное восполнение этого пробела за счет включения ограничения по ресурсам и перераспределения заданий в рамках ограниченного пула ремонтных бригад.

В последнее время существенное внимание уделяется использованию цифровых инструментов мониторинга, предиктивной аналитики и автоматизированной диспетчеризации. В работе [9] рассматриваются методы обучения с подкреплением и глубокого обучения с подкреплением (RL/DRL), применяемые к задачам планирования ТОиР и оптимизации производственных политик. Это, по мнению авторов, позволяет формировать адаптивные стратегии обслуживания в условиях неопределенности, минимизируя простои и издержки. Показывается, как различные архитектуры (DQN, PPO, Actor-Critic) могут быть использованы для автоматической генерации политик обслуживания и оптимального распределения ресурсов. Однако такие методы актуальны, прежде всего, для высокоавтоматизированных производственных систем, где оперативная адаптация к изменяющимся условиям обеспечивается высоким уровнем оснащения цифровыми устройствами. Авторы работы [10] предлагают подход, интегрированный с принципами *Индустрии 4.0* и позволяющий динамически корректировать производственные графики. Ключевым преимуществом модели является способность адаптироваться к реальным колебаниям графиков во времени за счет интеграции с ERP-системами и цифровыми каналами данных. Это подчеркивает важность разработки гибких систем планирования, способных реагировать на нестабильность производственной обстановки.

Заслуживают внимания гибридные подходы, включающие предварительную фильтрацию операций, жесткие ограничения на горизонты оптимизации и применение эвристических правил [11]. Это подтверждает актуальность разработки более легких, интерпретируемых методов, позволяющих перераспределять задания в условиях ограниченных вычислительных и организационных ресурсов [12].

Таким образом, несмотря на наличие значительного количества работ, посвященных отдельным аспектам организации, диспетчеризации и гибкого планирования заданий ТОиР, сохраняется дефицит решений, ориентированных на реализацию механизма управления исполнением заданий ТОиР с учетом реальной загрузки, ресурсных ограничений и условий производственной среды.

На этом фоне интерес вызывает методология *Workload Control* (WLC), изначально разработанная для управления производственными заказами в условиях ограниченных ресурсов. Принципы WLC (рис. 1) находят все большее применение в смежных задачах, включая логистику, обслуживание и диспетчеризацию производства [13-16].

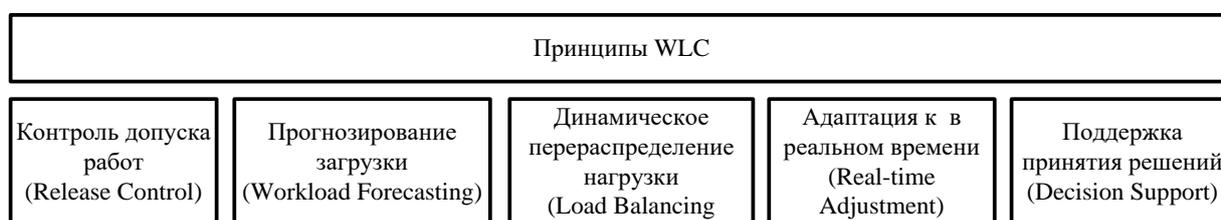


Рис. 1. Принципы WLC

Fig. 1. WLC principles

Адаптация ключевых принципов WLC к задачам ТОиР приводится в табл. 1.

Таблица 1.

Ключевые принципы WLC и их адаптация к системе ТОиР

Table 1.

Key principles of WLC and their adaptation to the maintenance and repair system

№ п.	Принцип WLC	Содержание	Реализация в задачах ТОиР
1	Release Control	Контроль допуска работ в систему на основе загрузки	Анализ ресурсоемкости и приоритета работ перед допуском в график ТОиР
2	Workload Forecasting	Прогнозирование загрузки и доступных мощностей	Расчет загрузки ремонтных бригад и оценка возможности принять новые задания
3	Load Balancing	Динамическое перераспределение нагрузки	Назначение/переназначение работ между бригадами для выравнивания загрузки
4	Real-time Adjustment	Корректировка плана при изменении условий	Реагирование на внеплановые ремонты и аварии, перераспределение ресурсов
5	Decision Support Interface	Поддержка принятия решений человеком-диспетчером	Автоматизированные рекомендации и визуализация вариантов перераспределения

Приведенные принципы концепции WLC отражают фундаментальные идеи организации процесса исполнения графика ТОиР с точки зрения управления потоками заданий. В контексте системы ТОиР они могут быть интерпретированы как гипотеза о возможности повышения устойчивости планирования за счет согласования скорости поступления и выполнения ремонтных работ. В частности, принцип входного контроля – регулирование поступления заданий в систему ТОиР приобретает форму динамического допуска заявок на выполнение ремонтов в зависимости от текущей загрузки ремонтных бригад и объема незавершен-

ных работ. Система должна сохранять баланс между входящим потоком заданий и доступными ресурсами, предотвращая перегрузку и образование избыточного «ремонтного задела». Поэтому принцип выходного контроля – управление выпуском заданий в рассматриваемой задаче – проявляется как согласование сроков и приоритетов между различными типами ремонтных мероприятий (плановыми, внеплановыми, аварийными). Он обеспечивает поддержание стабильного ритма выполнения работ и равномерное распределение трудозатрат между бригадами. Гипотеза о применимости данных принципов в контуре управления ТОиР заключается в том, что реализация двойного контроля (входного и выходного) создает предпосылки для адаптивного перераспределения заданий при изменении внешних условий, например, при поступлении срочных работ или снижении доступности ресурсов. Кроме того, использование правил диспетчеризации позволяет формализовать процесс принятия решений при распределении заданий. Это делает возможным построение алгоритмов, обеспечивающих согласование между плановыми показателями обслуживания и фактическими возможностями исполнителей, что соответствует идеологии WLC как системы, балансирующей между требованиями спроса и ограничениями производственной мощности.

Адаптация методологии WLC для задач планирования ТОиР предполагает не только контроль допуска заданий и балансировку загрузки, но и организацию замкнутого цикла регулирования потоков заданий. Подобный принцип, обеспечивающий согласование входных и выходных потоков в производственных системах, развит в [17], где предложена гибридная модель WLC, совмещающая дискретно-событийную имитацию и дискретно-временные регуляторы. Модель автоматически корректирует скорость выпуска заказов из пула и пропускную способность рабочих центров на основе фактического уровня незавершенного производства (WIP), что позволяет поддерживать устойчивость системы и компенсировать возмущения в режиме реального времени. Следовательно, при разработке алгоритма управления потоками ремонтных заданий важно обеспечить аналогичную способность к адаптации – через периодический анализ загрузки бригад и динамическое перераспределение заданий при отклонениях. Приоритеты заданий формируются в соответствии с известными правилами упорядочения, используемыми в теории расписаний: *Earliest Due Date (EDD)*, *Weighted Shortest Processing Time (WSPT)*, *Minimum Slack (MS)* и *Apparent Tardiness Cost with Setups (ATCS)* [18]. Эти правила широко применяются для задач диспетчеризации, где необходимо согласовать сроки выполнения и ресурсные ограничения, и в настоящем исследовании служат инструментом для ранжирования заданий по степени приоритетности при формировании пула и его выпуске в исполнение.

Для дальнейшей формализации предложенного подхода были определены исходные множества, параметры и этапы алгоритма (табл. 2 и 3).

Таблица 2.
Обозначения

Table 2.
Notations

Обозначение	Расшифровка	Тип
A	Множество всех заданий (плановых и внеплановых)	Множество
A_p	Задания, готовые по фронту работ и ресурсам	Множество
A_d	Задания, прошедшие контроль допуска	Множество
A_{ex}	Задания, переданные в исполнение	Множество
A_{ug}	Множество срочных заявок	Множество
M	Фронт работ, ресурсная обеспеченность	Множество
J	Множество ремонтных бригад	Множество
T	Множество временных интервалов	Множество

Окончание табл. 2.
Обозначения
Table 2 termination.
Notations

Обозначение	Расшифровка	Тип
R_j	Доступный ресурс времени бригады j	Скаляр
Q_j	Квалификация бригады j	Атрибут бригады
R	Совокупность ресурсов (материалы, инструменты, оснастка), необходимых для выполнения работ	Ресурсы
$W_j(t)$	Прогнозная загрузка бригады j в период t	Функция/массив
D_i	Трудоемкость задания i (человеко-часы)	Скаляр
P_i	Приоритет задания i	Скаляр
Q_i^{req}	Требуемая квалификация для задания i	Атрибут
δ_i	Факт отклонения по сроку исполнения задания i	Скаляр
U	Флаг необходимости перерасчета или возврата	Двоичный

Таблица 3.
Входные и выходные параметры алгоритма управления заданиями

Table 3.
Input and output parameters of the task management algorithm

№	Этап алгоритма	Входные параметры	Выходные параметры
1	Формирование пула заданий	A, M, T, Q_j	A_p
2	Прогнозирование загрузки	A_p, J, R_j	$W_j(t)$
3	Контроль допуска	$A_p, Q_j, Q_i^{req}, W_j(t)$	A_d
4	Перераспределение заданий	$A_d, W_j(t), P_i, Q_j$	Обновленное A_d
5	Назначение и запуск	A_d, J	A_{ex}
6	Мониторинг исполнения	A_{ex} , факт исполнения	δ_i , статусы
7	Анализ и определение отклонений	$\delta_i, A_{ug}, W_j(t)$	Обновленные A, U

Граф, представленный на рис. 2, демонстрирует замкнутый цикл управления потоками заданий и включает несколько этапов.

Цикл организован таким образом, чтобы обеспечить своевременное и обоснованное принятие решений о запуске заданий в условиях изменяющейся оперативной обстановки, ограниченной доступностью ресурсов, срочностью внеплановых заявок и колебаниями загрузки ремонтных бригад. Логика алгоритма управления циклом организована в виде последовательности этапов, перечень и содержание которых представлены в табл. 4.

Псевдокод реализации алгоритма приведен на рис. 3. Он описывает упрощенную последовательность шагов распределения заданий ремонтным бригадам на принципах WLC, включая формирование пула, контроль допуска и балансировку нагрузки.

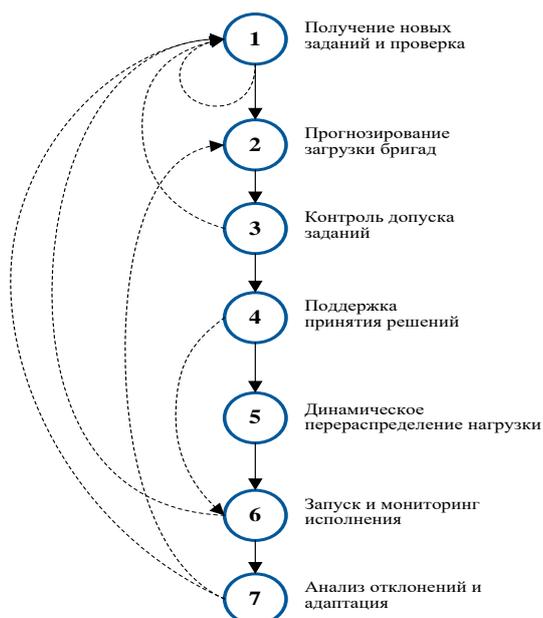


Рис. 2. Граф алгоритма управления потоками заданий в системе ТОиР

Fig. 2. Graph of the task flow control algorithm in the maintenance and repair system

Таблица 4.

Содержание этапов алгоритма

Table 4.

Algorithm stages

№	Этап	Содержание
1	Формирование пула заданий	Поступившие задания (плановые и внеплановые) агрегируются в общее множество A . Из него отбираются задачи, для которых подготовлен фронт работ, обеспечены ресурсы и доступна полная исходная информация. В результате формируется множество A_p , передаваемое на следующий этап.
2	Прогнозирование загрузки ремонтных бригад	Для каждой ремонтной бригады $j \in J$ рассчитывается прогнозная нагрузка $W_j(t)$ на временном интервале T_i . Анализируются пики загрузки и формируются сигналы перегрузок при превышении порогового значения ресурса R_j .
3	Контроль допуска заданий	Задания из проверяются на соответствие ресурсным и квалификационным ограничениям. В множество включаются только те задачи, которые могут быть выполнены без перегрузки и при наличии соответствующей квалификации исполнителей
4	Динамическое перераспределение заданий	При наличии сигналов перегрузки или поступлении срочных заявок из множества, производится перераспределение заданий между ремонтными бригадами. Учитываются текущая нагрузка, квалификация, приоритеты и доступные временные окна
5	Назначение заданий и передача на исполнение	Сформированные назначения передаются в систему мониторинга исполнения. Фиксируются статусы задач и производится контроль текущего хода выполнения
6	Анализ отклонений и принятие решений	По завершении выполнения или при наступлении событий (срочные заявки, отклонения) осуществляется анализ выполнения: рассчитываются отклонения δ_i , оцениваются риски. При необходимости инициируется возврат к этапам 2-3 с флагом $U = True$

```

Вход:
  T = {T1, ..., Tm}    // бригады
  Cap[T]              // доступная мощность бригад на период
  Jobs = {J1, ..., Jn} // задания периода
  WIPref              // целевой уровень WIP
  rule ∈ {EDD, WSPT, MS, ATCS}

Выход:
  Schedule[T]        // упорядоченный список заданий по бригадам

1: // Формирование приоритетов
2: for each J in Jobs do
3:   PI(J) ← Priority(rule, J) // напр.: EDD → PI=due date; WSPT → PI=dd/dur
4: end for
5: sort Jobs by PI(J) ascending
6: move Jobs to Pool

7: // Входной контроль (input control)
8: WIP ← 0
9: Buffer ← ∅
10: while Pool ≠ ∅ and WIP < WIPref do
11:   J ← extract_first(Pool)
12:   push(Buffer, J)
13:   WIP ← WIP + 1
14: end while

15: // Распределение по бригадам (output control)
16: for each J in Buffer do
17:   T* ← argmin_{T ∈ T} Load[T]
18:   if Load[T*] + dur(J) ≤ Cap[T*] then
19:     Schedule[T*].append(J)
20:     Load[T*] ← Load[T*] + dur(J)
21:     WIP ← WIP - 1
22:   else
23:     defer J to next period
24:   end if
25: end for

```

Рис. 3. Упрощенный алгоритм управления потоками заданий ремонтных бригад (на принципах WLC)

Fig. 3. A simplified algorithm for managing repair crew task flows (based on WLC principles)

Представленный псевдокод иллюстрирует ключевые шаги алгоритма, реализующего принципы двойного контроля (входного и выходного). Такая форма описания обеспечивает воспроизводимость метода и делает возможной его интеграцию в программную среду моделирования или аналитическую подсистему информационной системы ТОиР.

Для количественной оценки эффективности алгоритма управления потоками заданий на основе принципов WLC предлагается использовать совокупность интегральных и частных метрик, отражающих качество планирования, сбалансированность загрузки ресурсов, устойчивость к отклонениям и способность системы к адаптации. Оценка начинается с расчета коэффициента запуска заданий, определяющего долю задач, фактически допущенных к исполнению:

$$K_d = \frac{|A_{ug}|}{|A_{ex}|} \quad (1)$$

K_d служит показателем того, насколько эффективно работает механизм допуска заданий при заданных ограничениях. Значение K_d , близкое к 1, свидетельствует о высокой эффективности допуска при заданных ресурсных и организационных ограничениях.

Следующий параметр – средняя загрузка ремонтных бригад, рассчитываемая как среднее значение прогнозной загрузки по всем бригадам на каждом шаге времени:

$$\bar{W} = \frac{1}{|J| \cdot T} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} W(t) \quad (2)$$

Эта метрика позволяет оценить общую загрузку системы и ее использование в течение планового горизонта.

С целью анализа рисков сбоев и перегрузок рассчитывается коэффициент перегрузки, отражающий среднее относительное превышение допустимой загрузки:

$$K_{over} = \frac{1}{|J| \cdot T} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} \left(0, \frac{W_j(t) - R_j}{R_j} \right) \quad (3)$$

Показатель K_{over} , близкий к 0, указывает на устойчивую и сбалансированную систему. Он служит индикатором устойчивости системы и помогает выявлять структурные узкие места. Еще одним характеризующим параметром является среднее отклонение между планом и фактом выполнения заданий, который показывает точность соблюдения плановых сроков выполнения заданий:

$$\bar{\Delta d} = \frac{1}{|A_{ex}|} \sum_{i \in A_{ex}} |\delta_i| \quad (4)$$

Чем ниже значение этой метрики, тем выше соответствие между расчетным планом и реальным исполнением, а также устойчивость алгоритма к возмущениям.

Для оценки способности алгоритма обрабатывать внеплановые и срочные заявки предлагается использовать долю таких заданий, успешно допущенных к исполнению:

$$K_{ug} = \frac{|A_{ug}|}{|A_{ex}|} \quad (5)$$

Этот показатель отражает гибкость и оперативность алгоритма, а также характеризует его применимость в условиях нестабильной среды и высоких требований к времени реакции.

В совокупности указанные метрики позволяют не только оценить эффективность функционирования алгоритма, но и проводить сравнительный анализ различных сценариев, параметрических режимов и организационных структур, в которых может быть применен предложенный способ.

Для проверки работоспособности алгоритма выполнена его реализация в среде *Jupyter Notebook* с использованием языка программирования *Python* и библиотек *pandas* и *matplotlib*. Эти инструменты выбраны не только за счет своей гибкости и широких аналитических возможностей, но и по той причине, что они уже применяются в ИТ-ландшафте исследуемого промышленного предприятия и могут быть встроены в виде сервисов аналитических решений [19]. Это существенно упрощает задачу интеграции алгоритма в существующую информационную систему ТООИР, а также облегчает его сопровождение и дальнейшее развитие.

В качестве исходных данных использован подготовленный набор, представляющий типичную оперативную ситуацию планирования ремонтных заданий, фрагмент которого приводится в табл. 5.

Набор данных включает:

- перечень заданий с указанием идентификатора, типа задания (плановое, внеплановое, аварийное и др.), временного окна выполнения, оценки трудозатрат (в человеко-часах), необходимой квалификации исполнителей и текущего статуса выполнения (начато / не начато);
- информацию о ремонтных бригадах, включая их идентификаторы, уровень квалификации, доступное рабочее время в плановом периоде и текущую загруженность.

Таблица 5.
Фрагмент набора данных с заданиями

Table 5.
Fragment of the data set with tasks

№	Тип задания	Оценка труд. (ч.)	Квалификация	Приоритет	Доступное временное окно (дн.)	Флаг пересчета (0/1)	Назначение	Статус
1	План	4	2	1	с 4 по 7	0	Бригада 2	начато
2	Срочн.	2	3	1	с 4 по 8	1	Бригада 1	начато
3	Срочн.	4	1	1	с 4 по 8	1	Бригада 3	начато
4	Внепл.	6	2	2	с 6 по 9	0		нет
5	План	4	3	1	с 8 по 9	0		нет
6	Срочн.	5	3	2	с 7 по 10	1		нет
7	Внепл.	2	1	3	с 8 по 11	0		нет
8	План	6	2	2	с 9 по 12	0		нет
9	Внепл.	3	2	4	с 9 по 13	1		нет

Диаграмма на рис. 4 иллюстрирует временные интервалы выполнения заданий, где каждое задание представлено отрезком, начинающимся в момент старта и заканчивающимся в срок завершения.

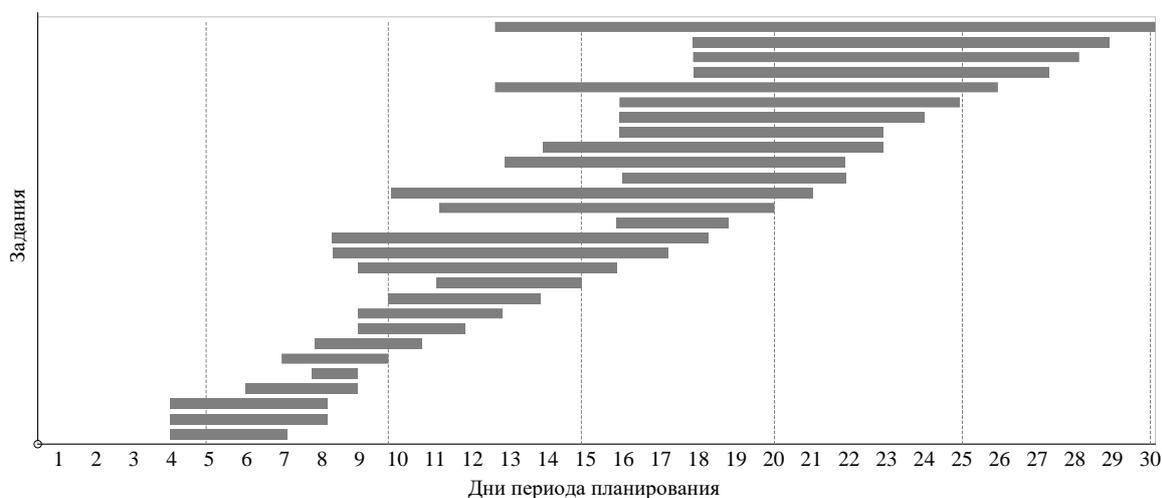


Рис. 4. Временные окна выполнения заданий

Fig. 4. Time windows for task execution

Алгоритм последовательно обрабатывает каждое новое задание, оценивая доступные ресурсы, квалификационные требования и остаток рабочего времени у каждой бригады, после чего производит назначение или фиксирует невозможность его выполнения в рамках текущих ограничений. Результат работы алгоритма назначения заданий приведен в табл. 6, где представлены сведения о каждом задании: идентификатор, тип (плановое, внеплановое и т.д.), временное окно выполнения, предполагаемые трудозатраты и назначенная бригада. Алгоритм выполняет распределение заданий с учетом соответствия квалификации исполнителей требуемому уровню, а также наличия доступных часов у бригады, равномерности распределения рабочей нагрузки между всеми доступными бригадами. В случаях, когда ни одна бригада не соответствует условиям назначения (например, из-за перегрузки или нехватки

квалификации), в поле «Назначенная бригада» указывается значение «нет доступной бригады». На рис. 5 представлена визуализация суммарной нагрузки на ремонтные бригады после перераспределения заданий, исключая уже начатые; столбчатая диаграмма показывает объем назначенной работы (в человеко-часах) по каждой из доступных бригад.

Таблица 6.
Результат работы алгоритма

Table 6.
Algorithm output

№	Тип задания	Срок исполнения	Трудозатраты (ч.)	Назначенная бригада
4	Внеплановое	с 6 по 9	6	Бригада 1
5	План	с 8 по 9	4	Бригада 1
6	Срочное	с 7 по 10	5	Бригада 1
7	Внеплановое	с 8 по 11	2	Бригада 2
8	План	с 9 по 12	6	Бригада 2
9	Внеплановое	с 9 по 13	3	Бригада 2
10	Внеплановое	с 10 по 14	8	Бригада 1
11	План	с 11 по 15	5	Бригада 2
12	Внеплановое	с 9 по 16	9	Бригада 1
13	План	с 8 по 17	2	Бригада 2
14	План	с 8 по 18	5	Бригада 1
15	План	с 16 по 19	1	Бригада 1
16	Срочное	с 11 по 20	2	Бригада 3
17	Внеплановое	с 10 по 21	8	нет доступной бригады
18	Внеплановое	с 16 по 22	6	Бригада 2
19	Внеплановое	с 12 по 22	2	Бригада 3
20	Внеплановое	с 14 по 23	5	Бригада 2
21	Внеплановое	с 16 по 23	1	Бригада 2
22	Срочное	с 16 по 24	7	нет доступной бригады
23	План	с 16 по 25	4	Бригада 3
24	Внеплановое	с 12 по 26	7	нет доступной бригады
25	Внеплановое	с 18 по 27	8	Бригада 2
26	План	с 19 по 28	6	нет доступной бригады
27	План	с 19 по 29	4	Бригада 3
28	Внеплановое	с 12 по 30	1	Бригада 3

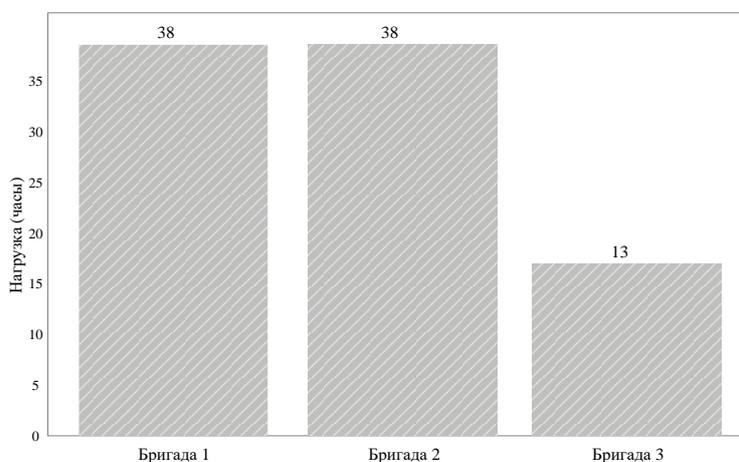


Рис. 5. Загрузка ремонтных бригад после исключения начатых заданий

Fig. 5. Loading of repair crews after exclusion of started tasks

Представленный набор данных позволил протестировать работу алгоритма в рамках приближенного к реальности сценария. Однако следует отметить, что приведенный пример носит демонстрационный характер и не содержит всей полноты информации, необходимой для полноценной количественной оценки эффективности работы алгоритма. В частности, отсутствуют такие важные параметры, как фактическое время исполнения заданий, данные об отклонениях от графика, предельные значения загрузки ремонтных бригад, а также исторические сведения об объемах внеплановых и срочных работ.

Тем не менее, структура и формат данных, полученных в результате выполнения алгоритма, соответствуют требованиям, предъявляемым к применению метрик, определенных выше. Это позволяет утверждать, что при наличии накопленной статистики, получаемой в процессе опытной эксплуатации или при интеграции в информационную систему предприятия, возможно автоматизированное применение следующих показателей:

- коэффициента успешного назначения заданий;
- коэффициентов средней и максимальной загрузки бригад;
- количества временных конфликтов между назначениями;
- уровня отклонений от допустимых сроков исполнения.

Таким образом, уже на этапе внедрения алгоритма создаются предпосылки для непрерывной оценки и оптимизации его работы на основе данных реального производственного цикла. Дальнейшая работа должна быть сосредоточена на интеграции модуля расчета метрик в контур системы ТОиР и формировании процедур накопления и анализа статистики исполнения.

Результаты и обсуждение

На основании результатов распределения заданий были рассчитаны количественные метрики эффективности алгоритма, представленные в табл. 7.

Таблица 7.

Метрики оценки работы алгоритма на тестовом наборе данных

Table 7.

Metrics for evaluating the algorithm's performance on the test dataset

Метрика	Значение
Общее число заданий (не начатых)	25
Число успешно назначенных заданий	21
Процент успешно назначенных заданий (%)	84,0
Число конфликтов временных окон	178
Коэффициент загрузки по бригадам	Нет данных

Несмотря на общую успешность распределения заданий (84 % заданий получили назначение), в четырех случаях алгоритм не смог найти доступную бригаду, что отразилось значением «нет доступной бригады». Это указывает на наличие ограничений, связанных с временными окнами или перегрузкой ремонтных бригад. Такие случаи имеют важное диагностическое значение: они сигнализируют о потенциальной несбалансированности производственного плана, необходимости коррекции параметров загрузки или включения более гибких правил переброса задач. Показатель «Число конфликтов временных окон», равный 178, отражает количество пересечений заданий во времени, в которых возникает конкуренция за ресурсы. Данная метрика имеет значение при анализе плотности графика и помогает оценить устойчивость расписания при росте числа заданий. В рассматриваемом эксперименте приоритет выполнения не был задействован, что также ограничивает возможности алгоритма в условиях дефицита ресурсов. На текущем этапе оценка таких метрик, как коэффициент загрузки бригад, степень перераспределения заданий и среднее отклонение от оптимального графика, не была реализована из-за отсутствия норм времени на выполнение задач. Од-

нако в промышленной эксплуатации все необходимые параметры (временные нормы, статусы выполнения, отклонения от графика) присутствуют в информационной системе, что позволяет включить оценку эффективности в производственный контур без изменения существующего учета.

Таким образом, проведенный эксперимент подтвердил работоспособность алгоритма в тестовой среде и выявил ключевые аспекты, требующие дальнейшего исследования: накопление статистики для расширенного анализа, автоматическое устранение конфликтов, интеграция с модулями прогнозирования загрузки и расширение модели приоритетов.

Заключение

Проведенный анализ проблематики управления потоками заданий на ремонтные работы в условиях изменчивого графика показал необходимость динамического перераспределения задач с учетом текущей загруженности ресурсов и ограничений по времени. Разработанный алгоритм ориентирован на интеграцию в информационную систему ТОиР и способен адаптироваться к оперативным изменениям без потери управляемости процессов. Математическая формализация задачи, а также введенные критерии и метрики позволили объективно подойти к оценке эффективности алгоритма. Практический пример с использованием Python-инструментов и тестового набора данных продемонстрировал возможность автоматизированного назначения заданий и выявил потенциальные конфликты, связанные с ограниченностью ресурсов. Результаты эксперимента подтвердили работоспособность предложенного подхода в ограниченной тестовой среде. Вместе с тем, выявленные случаи неназначенных заданий и конфликты временных окон указывают на необходимость дальнейшей проработки механизма приоритизации, обработки исключений и накопления статистических данных для адаптации параметров модели.

В дальнейшем планируется расширение функциональности алгоритма за счет интеграции прогнозных моделей загрузки, учета нормативов выполнения и автоматической корректировки графиков. Полученные результаты могут быть использованы в системах управления производственным обслуживанием, а также в других прикладных задачах диспетчеризации и управления потоками заданий в условиях ограниченных ресурсов.

Библиографический список

1. **Новикова, Т.А.** Сравнительный анализ существующих стратегий организации технического обслуживания и ремонта сложных технических систем / Т.А. Новикова, Е.В. Ляпунцова // *Инновации в менеджменте*. – 2024. – № 4(42). – С. 48-55.
2. **Житомирский, Б.Л.** Современное состояние и перспективы развития системы технического обслуживания и ремонта газотурбинных двигателей / Б.Л. Житомирский, Г.К. Сиденко, Т.В. Игнатова // *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. – 2025. – № 1(145). – С. 72-78.
3. **Завьялов, А.П.** Об изменении требований к технической диагностике для внедрения методов предиктивной аналитики при переходе к риск-ориентированной системе эксплуатации оборудования топливно-энергетического комплекса / А.П. Завьялов, И.Ф. Дяченко // *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. – 2025. – № 1(145). – С. 68-71.
4. **Купреенко, А.И.** Планирование технических обслуживаний и ремонтов оборудования / А.И. Купреенко, Х.М. Исаев, А.А. Рытчер // *Современные тенденции развития аграрной науки: Сбор. науч. трудов межд. науч.-пр. конф. Часть 2*. – Брянск: Брянский государственный аграрный университет, 2022. – С. 546-549.
5. **Pires, C.** Mathematical model for maintenance planning of machine tools / C. Pires, I. Lopes, L. Basto // *Procedia Manufacturing*. – 2019. – Vol. 38. – Pp. 1197-1204.
6. **Angeles, E.** Optimal Inspection and Preventive Maintenance Scheduling of Mining Equipment / E. Angeles, M. Kumral // *Journal of Failure Analysis and Prevention*. – 2020. – Vol. 20, No. 4. – P. 1408-1416. – DOI 10.1007/s11668-020-00949-z.

7. **Sheikhalishahi, M.** Dynamic maintenance planning approach by considering grouping strategy and human factors / M. Sheikhalishahi, A. Azadeh, L. Pintelon // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2017. – Vol. 107. – Pp. 289-298.
8. **Geurtsen M.** Production, maintenance and resource scheduling: A review / M. Geurtsen, J.B.H.C. Didden, J. Adan [et al.] // *European Journal of Operational Research*. – 2022. – DOI 10.1016/j.ejor.2022.03.045.
9. **Ogunfowora, O.** Reinforcement and deep reinforcement learning-based solutions for machine maintenance planning, scheduling policies, and optimization / O. Ogunfowora, H. Najjaran // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2023. – Vol. 70. – P. 244-263. – DOI 10.1016/j.jmsy.2023.07.014.
10. **Kianpour, P.** Automated job shop scheduling with dynamic processing times and due dates using project management and industry 4.0. / P. Kianpour, D. Gupta, K.K. Krishnan, B. Gopala-krishnan // *Journal of Industrial and Production Engineering*. – 2021. – No. 38(7). – Pp. 485-498.
11. **Kunath, S.** MILP performance improvement strategies for short-term batch production scheduling: a chemical industry use case / S. Kunath, M. Kühn // *SN Appl. Sci*. – 2022. – № 4. P. 87.
12. **Huang, L.** An Auto-MILP Model for Flexible Job Shop Scheduling Problem / L. Huang, R. Su // *IFAC-Papers OnLine*. – 2022. – Vol. 55, Issue 3. – Pp. 137-142.
13. **Haeussler, S.** Comparison between rule-and optimization-based workload control concepts: a simulation optimization approach / S. Haeussler, P. Netzer // *International Journal of Production Research*. – 2020. – Vol. 58(12). – P. 3724-3243.
14. **Missbauer, H.** Order release in production planning and control systems: challenges and opportunities / H. Missbauer, R. Uzsoy // *International Journal of Production Research*. – 2022. – Vol. 60, № 1. – P. 256-276.
15. **Costa, F.** Labor flexibility integration in workload control in Industry 4.0 era / F. Costa, A. Portioli-Staudacher // *Operations Management Research*. – 2021. – Vol. 14, № 3-4. – P. 420-433.
16. **Vanheusden S.** Analysing the effectiveness of workload balancing measures in order picking operations / S. Vanheusden, T. Van Gils, K. Braekers [et al.] // *International Journal of Production Research*. – 2022. – Vol. 60, № 7. – P. 2126-2150.
17. **Mušič, G.** Closed-loop workload input-output control of production systems: A hybrid simulation study / G. Mušič, J.K. Sagawa // *Computers & Industrial Engineering*. – 2024. – Vol. 198. 110669. DOI: 10.1016/j.cie.2024.110669.
18. **Pinedo, M.L.** *Scheduling*. – Springer Science Business Media: LLC, 2016. – 674 p.
19. **Насонов, М.А.** Архитектурная трансформация системы технического обслуживания оборудования на промышленном производстве / М.А. Насонов, И.С. Решетников // *Автоматизация в промышленности*. – 2025. – № 3. – С. 3-11.

References

1. Novikova T.A., Lyapunsova E.V. Sravnitel'nyi analiz sushchestvuyushchikh strategii organizatsii tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Comparative analysis of existing strategies for organizing maintenance and repair of complex technical systems]. *Innovatsii v menedzhmente [Innovations in Management]*. 2024; 4(42): 48-55 (in Russian).
2. Zhitomirskii B.L., Sidenko G.K., Ignatova T.V. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta gazoturbinnnykh dvigatelei [Current state and development prospects of the gas turbine engine maintenance and repair system]. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa [Equipment and Technologies for the Oil and Gas Complex]*. 2025; 1(145): 72-78 (in Russian).
3. Zavyalov A.P., Dyachenko I.F. Ob izmenenii trebovaniy k tekhnicheskoi diagnostike dlya vnedreniya metodov prediktivnoi analitiki pri perekhode k risk-orientirovannoi sisteme ekspluatatsii oborudovaniya toplivno-energeticheskogo kompleksa [On changing the requirements for technical diagnostics for implementing predictive analytics methods when transitioning to a risk-based equipment operation system in the fuel and energy sector]. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa [Equipment and Technologies for the Oil and Gas Complex]*. 2025; 1(145): 68-71 (in Russian).
4. Kupreenko A.I., Isaev Kh.M., Rytcher A.A. Planirovanie tekhnicheskikh obsluzhivaniy i remontov oborudovaniya [Planning of equipment maintenance and repairs]. In: *Sovremennye tendentsii razvitiya agrarnoi nauki: Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Chast' 2 [Modern trends in the development of agrarian science: Collection of scientific papers of the international*

- al scientific-practical conference. Part 2]. Bryansk: Bryansk State Agrarian University; 2022. p. 546-549 (in Russian).
5. Pires C., Lopes I., Basto L. Mathematical model for maintenance planning of machine tools. *Procedia Manuf.* 2019;38:1197-204.
 6. Angeles E., Kumral M. Optimal inspection and preventive maintenance scheduling of mining equipment. *J Fail Anal Prev.* 2020;20(4):1408-16. doi: 10.1007/s11668-020-00949-z.
 7. Sheikhalishahi M., Azadeh A., Pintelon L. Dynamic maintenance planning approach by considering grouping strategy and human factors. *Process Saf Environ Prot.* 2017;107:289-98.
 8. Geurtsen M., Didden JBHC., Adan J., et al. Production, maintenance and resource scheduling: A review. *Eur J Oper Res.* 2022. doi: 10.1016/j.ejor.2022.03.045.
 9. Ogunfowora O., Najjaran H. Reinforcement and deep reinforcement learning-based solutions for machine maintenance planning, scheduling policies, and optimization. *J Manuf Syst.* 2023;70:244-263. doi: 10.1016/j.jmsy.2023.07.014.
 10. Kianpour P, Gupta D, Krishnan KK, Gopala-krishnan B. Automated job shop scheduling with dynamic processing times and due dates using project management and industry 4.0. *J Ind Prod Eng.* 2021;38(7):485-498.
 11. Kunath S., Kühn M. MILP performance improvement strategies for short-term batch production scheduling: a chemical industry use case. *SN Appl Sci.* 2022;4:87.
 12. Huang L., Su R. An Auto-MILP model for flexible job shop scheduling problem. *IFAC-PapersOnLine.* 2022;55(3):137-142.
 13. Haeussler S., Netzer P. Comparison between rule- and optimization-based workload control concepts: a simulation optimization approach. *Int J Prod Res.* 2020;58(12):3724-3743.
 14. Missbauer H., Uzsoy R. Order release in production planning and control systems: challenges and opportunities. *Int J Prod Res.* 2022;60(1):256-276.
 15. Costa F., Portioli-Staudacher A. Labor flexibility integration in workload control in Industry 4.0 era. *Oper Manag Res.* 2021;14(3-4):420-433.
 16. Vanheusden S., Van Gils T., Braekers K., et al. Analysing the effectiveness of workload balancing measures in order picking operations. *Int J Prod Res.* 2022;60(7):2126-2150.
 17. Mušič G., Sagawa J.K. Closed-loop workload input-output control of production systems: A hybrid simulation study. *Comput Ind Eng.* 2024;198:110669. doi: 10.1016/j.cie.2024.110669.
 18. Pinedo M.L. *Scheduling.* 5th ed. New York: Springer; 2016. 694 p.
 19. Nasonov M.A., Reshetnikov I.S. Arkhitekturnaya transformatsiya sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya oborudovaniya na promyshlennom proizvodstve [Architectural transformation of the equipment maintenance system in industrial production]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti [Industrial Automation].* 2025;(3):3-11 (in Russian).

**Дата поступления
в редакцию: 24.11.2025**

**Дата принятия
к публикации: 31.01.2026**