

На правах рукописи

Федоров Валерий Анатольевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЗАГРУЗКИ
ОБОРУДОВАНИЯ ЗАГОТОВКАМИ В МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ НА ОСНОВЕ ГРУППОВОГО МЕТОДА**

Специальность 05.02.22 – Организация производства (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2022

Работа выполнена в Калужском филиале федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» на кафедре машиностроительных технологий.

Научный руководитель: **Малышев Евгений Николаевич**
кандидат технических наук, доцент, заведующий
кафедрой машиностроительных технологий
Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Антипов Дмитрий Вячеславович**
доктор технических наук, доцент, заведующий
кафедрой производства летательных аппаратов и
управления качеством в машиностроении
ФГАОУ ВО «Самарский национальный
исследовательский университет имени академика
С.П. Королева»

Загидуллин Равиль Рустэм-бекович
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры автоматизации технологических
процессов института авиационных технологий и
материалов ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный авиационный технический
университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «**Казанский национальный
исследовательский технологический
университет**»

Защита диссертации состоится 28 апреля 2022 г. в 13.00 на заседании диссертационного совета Д 212.141.23 в МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, ауд. 316 ГУК.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба отправлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



Е.С. Постникова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современное машиностроительное производство в значительной степени является многономенклатурным. Это обусловлено возросшими и постоянно изменяющимися требованиями заказчика к уникальным свойствам продукции, а также отказом производителя изготавливать продукцию «в запас» и содержать при этом избыточное складское хозяйство.

Основу обрабатывающего и сборочного оборудования машиностроительных предприятий для обеспечения быстрого перехода на выпуск новой продукции обычно составляют станки с ЧПУ, обладающие высокой машинной гибкостью. В тоже время загрузка станка – подача заготовок на это оборудование и их установка – как правило осуществляется вручную из-за сложности и высокой трудоемкости индивидуальных переналадок автоматизированных загрузочных систем. Расшить это «узкое место» возможно путем реализации организационных мер, основанных на групповом подходе. На сегодняшний день в литературе практически отсутствуют работы, освещающие вопросы теории и практики организации наладки и работы загрузочных систем на основе группового метода.

Исходя из вышесказанного актуальной является разработка таких моделей организации производственных процессов в многономенклатурном производстве, которые позволяли бы специалистам на этапах подготовки производства принимать научно обоснованные решения по организации работы загрузочных систем, в том числе используя преимущества группового метода.

Степень разработанности темы исследования. Современные научные труды зарубежных и отечественных ученых содержат теоретические и методологические разработки, являющиеся основой для проведения последующих теоретических и практических работ в исследуемой области.

Вопросы быстрой переналадки оборудования и оснастки сегодня относят к организации «бережливого производства», которому посвятили свои работы: Абросимова А.А., Адлер Ю.П., Баев Г.О., Васильев В.А. Вумек Д.П., Вэйдер М.И., Джексон Т., Дроговоз П.А., Имаи М., Ишикава, Ларионов В.Г., Рыжикова Т.Н., Синго С., Омельченко И.Н., Фалько С.Г. и другие.

В области цифровой трансформации основных и вспомогательных процессов производства большой вклад внесли: Амелин С.В., Бабушкин В.М., Баранов В.В., Батищев В.И., Бром А.Е., Васильев В.А., Волчкевич Л.И., Григорьев С.Н., Дроговоз П.А., Загидуллин Р.Р., Захаров М.Н., Иващенко А.В., Кутин А.А., Мингалеева Г.Ф., Орлов А.И., Попов В.Л., Хаймович И.Н., Цырков А.В., Червяков Л.М., Шарафеева И.Ш., Шинкевич А.И. и другие.

На совершенствование инструментария организации современного производства направлены работы: Антипова Д.В., Бабушкина В.М., Гришанова А.В., Мингалеева Г.Ф., Омельченко И.Н., Попова В.Л., Сафиуллина Н.З., Фалько С.Г., Хлынина Э.В., Хоботова Е.Н., Шарафеева И.Ш. и других.

Огромный вклад в развитие конструкций и практического применения систем загрузки оборудования внесли российские научные школы ТулГУ, МГТУ им. Н.Э. Баумана и другие.

Цель работы заключается в повышении эффективности многономенклатурных машиностроительных производств путем снижения потерь времени на переналадку систем загрузки оборудования на основе группового метода организации их работы.

Основные задачи исследования:

1. Анализ современной организации процесса загрузки оборудования заготовками в машиностроении с целью определения значимости группового метода наладки систем загрузки как инструмента совершенствования организации многономенклатурного производства.

2. Разработка и апробация вероятностной модели работы многономенклатурной производственной системы с варьируемыми размерами партий изделий, позволяющей прогнозировать и оценивать эффективность организации наладки систем загрузки оборудования на основе группового метода.

3. Формирование системы ограничений, влияющих на организацию работы систем загрузки оборудования заготовками в производственных условиях.

4. Разработка и реализация метода оптимизации процесса наладки систем загрузки оборудования на основе варьирования состава наладочных работ и установления ограничений на варианты объединения заготовок в группы с целью минимизации затрат времени на наладку систем загрузки.

5. Установление и формализация зависимости трудоемкости наладки систем загрузки оборудования от значений организационно-технических параметров систем загрузки, таких как состав и допустимая погрешность выполнения наладочных работ, для оценивания эффективности организации наладки на основе группового метода.

Объект исследования: многономенклатурная производственная система с варьируемыми размерами партий изделий.

Предмет исследования: организация процесса загрузки оборудования заготовками.

Область исследования. Основные положения диссертации соответствуют области «4. Моделирование и оптимизация организационных структур и производственных процессов, вспомогательных и обслуживающих производств. Экспертные системы в организации производственных процессов» по паспорту научной специальности 05.02.22 – Организация производства (машиностроение).

Научная новизна исследования:

1. Разработана вероятностная модель работы многономенклатурной производственной системы, отличающаяся от других тем, что позволяет оценивать эффективность организации переналадки систем загрузки

оборудования на основе группового метода с варьируемыми размерами партий изделий.

2. Разработан метод оптимизации процесса наладки систем загрузки оборудования на основе варьирования состава наладочных работ и установления ограничений на варианты объединения заготовок в группы с целью минимизации затрат времени на наладку таких систем в условиях многономенклатурного производства.

3. Впервые установлена и формализована зависимость трудоемкости наладки систем загрузки оборудования от значений организационно-технических параметров систем загрузки, таких как состав и допустимая погрешность выполнения наладочных работ, для оценивания эффективности организации наладки на основе группового метода.

Практическая значимость работы заключается в выявленных организационно-технических и конструктивных ограничениях, влияющих на организацию работы систем загрузки оборудования заготовками в производственных условиях, а также в разработанной функциональной модели процесса организации загрузки оборудования заготовками на основе группового метода, что позволяет осуществлять эффективное управление трудоемкостью многономенклатурных машиностроительных производств.

Методология и методы исследования. Для решения задач диссертационного исследования применены основные положения теории производительности машин и труда, положения теории вероятностей и математической статистики, корреляционного анализа, методы планирования и проведения многофакторных экспериментов.

Достоверность результатов исследования подтверждается тем, что исходными данными послужили показатели действующих производств, теоретическая часть работы построена на известных, проверяемых данных и фактах, широко освещенных в открытых источниках, практические расчеты выполнены с применением общепринятых программных продуктов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Вероятностная модель работы многономенклатурной производственной системы с варьируемыми размерами партий изделий, позволяющая оценивать эффективность организации наладки систем загрузки оборудования на основе группового метода.

2. Метод оптимизации процесса наладки систем загрузки оборудования на основе варьирования состава наладочных работ и установления ограничений на варианты объединения заготовок в группы с целью минимизации затрат времени на наладку таких систем в условиях многономенклатурного производства.

3. Зависимость трудоемкости наладки систем загрузки оборудования от значений организационно-технических параметров систем загрузки, таких как состав и допустимая погрешность выполнения наладочных работ, для оценивания эффективности организации наладки на основе группового метода.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях: Международная

научно-практическая конференция «Автоматизация: проблемы, идеи, решения», г. Стерлитамак, 2018 г.; I Международная научно-практическая конференция «Прорывные технологии и коммуникации в производстве», г. Волгоград, 2018 г.; II Международная научная конференция «Инновационные технологии, экономика и менеджмент в промышленности», г. Волгоград, 2021 г.; Всероссийская научно-техническая конференция «Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе», г. Калуга, 2018, 2019 и 2020 гг.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационного исследования приняты к применению в Филиале ООО «КЭЗ КВТ» в г. Калуге для определения оптимальных значений параметров групповых наладок систем загрузки оборудования на основе бункерно-ориентирующих устройств крьючкового типа с целью минимизации затрат времени на их переналадку.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 11 научных работах, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 1 работа – в сборнике, индексируемом в базе «Scopus». Общий объем 1,84 п.л.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения с основными выводами, списка литературы, включающего 202 наименования. Материал работы изложен на 152 страницах машинописного текста, содержит 61 рисунок и 30 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** раскрыта актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, показаны научная новизна и практическая значимость результатов проведенной работы.

В **Главе 1** приведены результаты анализа современной организации процесса загрузки оборудования заготовками в машиностроении. Анализ показал высокую значимость группового метода наладки систем загрузки как инструмента совершенствования организации многономенклатурного производства. Установлено, что конструктивно значительная часть современных систем загрузки оборудования обладает потенциалом для организации групповой наладки.

Организовать процесс загрузки оборудования заготовками – значит, опираясь на конструкторско-технологические свойства заготовок, на технические характеристики оборудования и оснастки, а также на совокупность производственных условий, в первую очередь таких как квалификация наладчика и техническое оснащение его работы, установить и реализовать такие требования к наладке системы загрузки и такую последовательность подачи заготовок на станки, которые обеспечили бы заданную производительность.

На сегодняшний день принято, что отправной точкой для организации групповой обработки являются предварительно сформированные (по

конструктивно-технологическим признакам) группы изделий, а результатом подготовки производства являются групповая технология и требования к параметрам создаваемой производственной системы для реализации разработанной технологии. При организации групповой загрузки оборудования заготовками, в отличие от организации групповой обработки, предстоит решить обратную задачу: сформировать группы заготовок и очередность их подачи на оборудование, опираясь на параметры существующей производственной системы. При этом группы впоследствии могут расширяться, только если параметры новых изделий не выходят за установленные границы возможностей производственной системы.

В Глава 2 разработана и апробирована вероятностная модель работы многономенклатурной производственной системы с варьируемыми размерами партий изделий, позволяющая прогнозировать и оценивать эффективность организации наладки систем загрузки оборудования на основе группового метода.

В главе обосновано использование коэффициента машинной гибкости в качестве критерия оценки эффективности соответствующих организационных решений. Так, например, проанализирована деятельность производственной системы по изготовлению контактных гильз и наконечников для соединения электрических проводов и кабелей. Основными элементами указанной производственной системы (эПС j) являются: система загрузки: бункерно-ориентирующее устройство крючкового типа (эПС1), транспортный лоток-накопитель (эПС2), впускной отсекающий (эПС3), выпускной отсекающий (эПС5); система обработки: шпиндельный агрегат (эПС4). На Рисунке 1 в виде графической модели показано формирование затрат времени на изготовление i -й партии изделий.

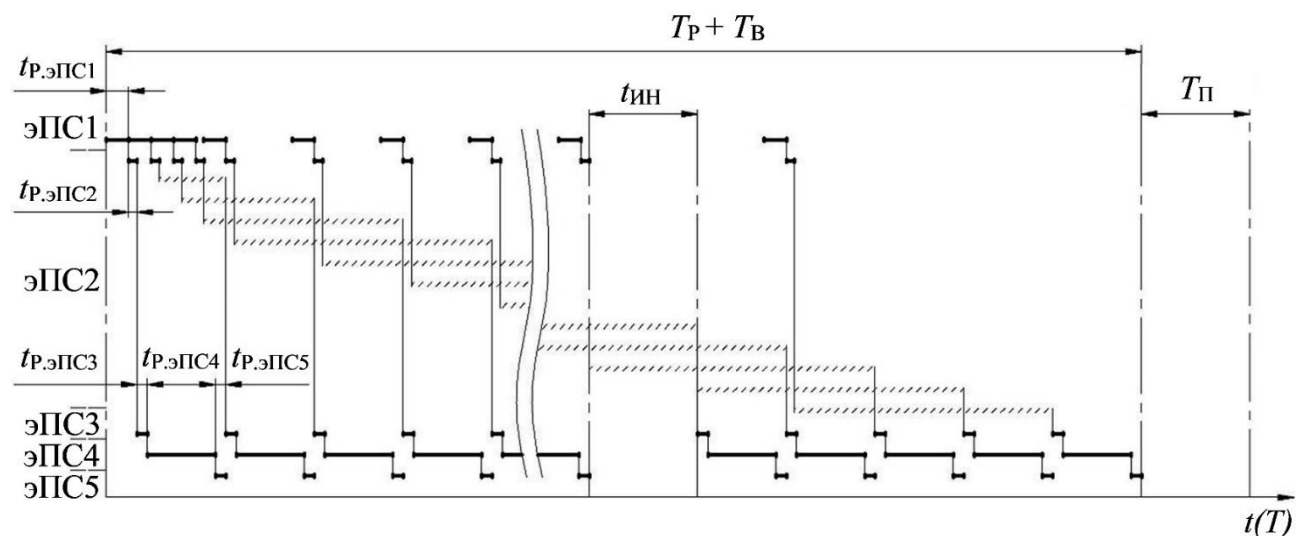


Рисунок 1. Временная диаграмма использования производственной системы

Затраты времени на изготовление продукции для разных элементов производственной системы обозначены $t_{р.эПС}$ с указанием индекса элемента. По

аналогии через $t_{п.эПС}$ обозначены затраты времени на переналадку элементов системы.

Применительно к описанной производственной системе, и подобных ей систем, разработана и апробирована вероятностная модель, представляющая собой систему уравнений (1), устанавливающих количественные зависимости между рассматриваемыми параметрами:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_i | P(N_i = \xi), N_{min} \leq \xi \leq N_{max} \\ T_{Pi} = t_{п.эПС1} + t_{п.эПС2} + (t_{п.эПС3} + t_{п.эПС4} + t_{п.эПС5})N_i \\ T_{Bi} = \frac{t_{п.эПС4}N_i}{T} t_{ин} \\ T_{Pi} = K_{п.i}t_{п.эПС1} + t_{п.эПС2} + t_{п.эПС3} + t_{п.эПС4} + t_{п.эПС5} \\ K_{п.i} = \begin{cases} 0, & i \in D \\ 1, & i \in (M \setminus D) \end{cases} \\ K_{Г.М.i} = \frac{T_{Pi}}{T_{Pi} + T_{Bi}} \\ K_{Г.М.} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{Г.М.i}N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \end{array} \right. , \quad (1)$$

где N_i – количество заготовок i -го типоразмера – дискретная величина из множества натуральных значений N , находящихся в диапазоне $[N_{min}, N_{max}]$. При вероятностном подходе:

$$N_i | P(N_i = \xi), N_{min} \leq \xi \leq N_{max} , \quad (2)$$

где ξ – целочисленная случайная величина, принимающая одно из значений из диапазона $[N_{min}, N_{max}]$ с соответствующими вероятностями $P(N_i = \xi)$;

T_{Pi} – затраты времени на переналадку системы при переходе на выпуск i -го типоразмера заготовок, мин;

T_{Pi} – затраты времени на обработку i -го типоразмера заготовок, мин;

T_{Bi} – затраты времени на восстановление работоспособности системы, не связанные с ее переналадкой, мин;

T – стойкость режущих инструментов, мин;

$t_{ин}$ – время на смену одного комплекта инструментов, мин;

$K_{Г.М.}$ – коэффициент машинной гибкости, характеризующий приспособленность производственной системы в целом для переналадки на изготовление других типоразмеров изделий;

$K_{Г.М.i}$ – коэффициента машинной гибкости, характеризующий приспособленность производственной системы для переналадки на изготовление i -го типоразмера заготовок;

$K_{п.i}$ – коэффициент необходимости переналадки для i -го типоразмера заготовок, принимающий значение единица, если переналадка требуется, или – нулевое значение, если переналадка не требуется;

M – множество типоразмеров заготовок;

D – множество типоразмеров заготовок, принадлежащих множеству M и не требующих переналадки.

Модель была апробирована методом Монте-Карло. В соответствии с данными, предоставленными Филиалом ООО «КЭЗ КВТ» в г. Калуге, посредством ЭВМ генерировались псевдослучайные значения N_i в диапазоне от $N_{min} = 50$ до $N_{max} = 500$ штук на основе равномерного распределения для $n = 100$ последовательных партий производимых изделий.

Необходимость переналадки системы загрузки $P_{п}$ задавалась как отношение количества типоразмеров заготовок, требующих переналадки (для которых $K_{п.i} = 0$), к общему количеству типоразмеров заготовок:

$$P_{п} = \frac{|M \setminus D|}{|M|} = \frac{|M \setminus D|}{n}. \quad (3)$$

На Рисунке 2 представлены результаты моделирования в виде гистограмм.

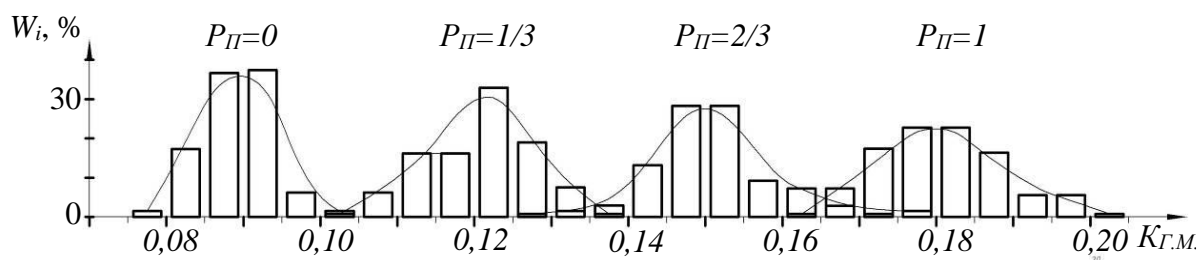


Рисунок 2. Влияние необходимости переналадки системы $P_{п}$ на коэффициент машинной гибкости $K_{г.м.}$ величине партии заготовок от 50 до 500 изделий

Гистограммы, относящиеся отдельно к разным уровням $P_{п}$, объединены сплайн-линиями. Выполненное моделирование показало, что для рассматриваемой производственной системы переход системы загрузки на групповую наладку для одной трети обрабатываемых изделий снижает значение коэффициента машинной гибкости почти на четверть по сравнению с непереключаемой системой загрузки, для двух третей изделий – снижение в полтора раза, а использование самонастраивающихся загрузочных систем обеспечивает снижение значения коэффициента в два раза.

В Глава 3 выявлены ограничения на организацию работы систем загрузки оборудования в производственных условиях.

В работе установлены номенклатура параметров системы загрузки, факторы, влияющие на значения параметров наладки, и их влияние на производительность; введен показатель «плотность наладки» как характеристика конструктивной готовности системы загрузки оборудования к

групповой наладке; апробировано использование установленного параметра для оценки готовности системы загрузки оборудования к работе в условиях групповой наладки при различных накладываемых на нее ограничениях. Исследования выполнялись на примере систем загрузки с крючковыми и штыревыми бункерно-ориентирующими устройствами (БОУ).

В работе поставлена и решена практическая задача организовать работу систем загрузки путем ориентированной выдачи на оборудование девяти типоразмеров заготовок типа втулки/стаканчики, параметры которых приведены в Таблице 1 в порядке увеличения значений наружных диаметров.

Показано, что наладить, например, крючковое БОУ – значит для работы с заданной номенклатурой и очередностью подачи заготовок определить и установить величину R_H вылета крючков с диаметром заборной части $d_{кр}$.

Экспериментально с привлечением метода ранговой корреляции Спирмена подтверждено, что производительность крючкового БОУ при разных значениях наружного диаметра, диаметра отверстия и длины втулок практически не зависит от положения крючка внутри просветов отверстий этих деталей. Это позволяет без существенной потери или роста производительности (от 3 до 5 %) осуществлять ориентирование группы различных заготовок при одной наладке.

Таблица 1.

Геометрические параметров ориентируемых заготовок

Параметры	Типоразмер заготовки (втулки)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Наружный диаметр втулок $d_{вт}$, мм	10,0	12,6	16,0	18,2	20,0	22,4	24,0	27,0	32,4
Длина втулок $L_{вт}$, мм	18,0	20,4	20,0	32,0	30,6	40,0	36,6	54,0	48,0
Диаметр отверстия во втулках $D_{вт}$, мм	9,0	10,6	14,2	15,0	14,6	14,6	19,6	23,6	27,0

Выявлено, что первая группа ограничений по организации работы системы загрузки в производственных условиях связана с конструктивными ограничениями – с геометрическими и физико-механическими параметрами систем и объектов загрузки. Вторая группа ограничений – организационно-технические ограничения – связана с составом наладочных работ, квалификацией наладчика и техническим оснащением его работы, которые можно задавать в виде погрешности выполнения наладочных работ – максимального значения допуска на точность наладки (TR_H).

Например, на Рисунке 3 показаны диапазоны наладок для девяти типоразмеров заготовок, параметры которых приведены в Таблице 1, и диаметре крючка $d_{кр} = 10$ мм с учетом погрешности наладки.

Предложен показатель «плотность наладки» как характеристика конструктивной готовности системы загрузки оборудования к работе в условиях групповой наладки. Для определения значения плотности наладки ρ_H – отношения площади заштрихованной фигуры к площади прямоугольника,

ограниченного границами возможной наладки $R_{H\min}$ и $R_{H\max}$ и количеством типоразмеров ориентируемых заготовок n , – использовано отношение:

$$\rho_H = \frac{1}{n(R_{H\max i} - R_{H\min i})} \int_{R_{H\min i}}^{R_{H\max i}} k(R_H) dR_H, \quad (4)$$

где k – количество заготовок, ориентированных с одной наладки.

Потенциал наладок системы загрузки можно оценить близостью значения этого показателя к единице: чем ближе к единице – тем выше потенциал.

В работе показано, что наладки, обладающие наибольшей «плотностью», также в наибольшей степени формируют номенклатуру так называемых «базовых» наладок, что подтверждает эффективность критерия «плотность» наладки как характеристики готовности системы загрузки оборудования к работе в условиях групповой наладки. Наладки, обладающие наибольшим показателем плотности, образуют множество базовых наладок H_B для дальнейшего рассмотрения.

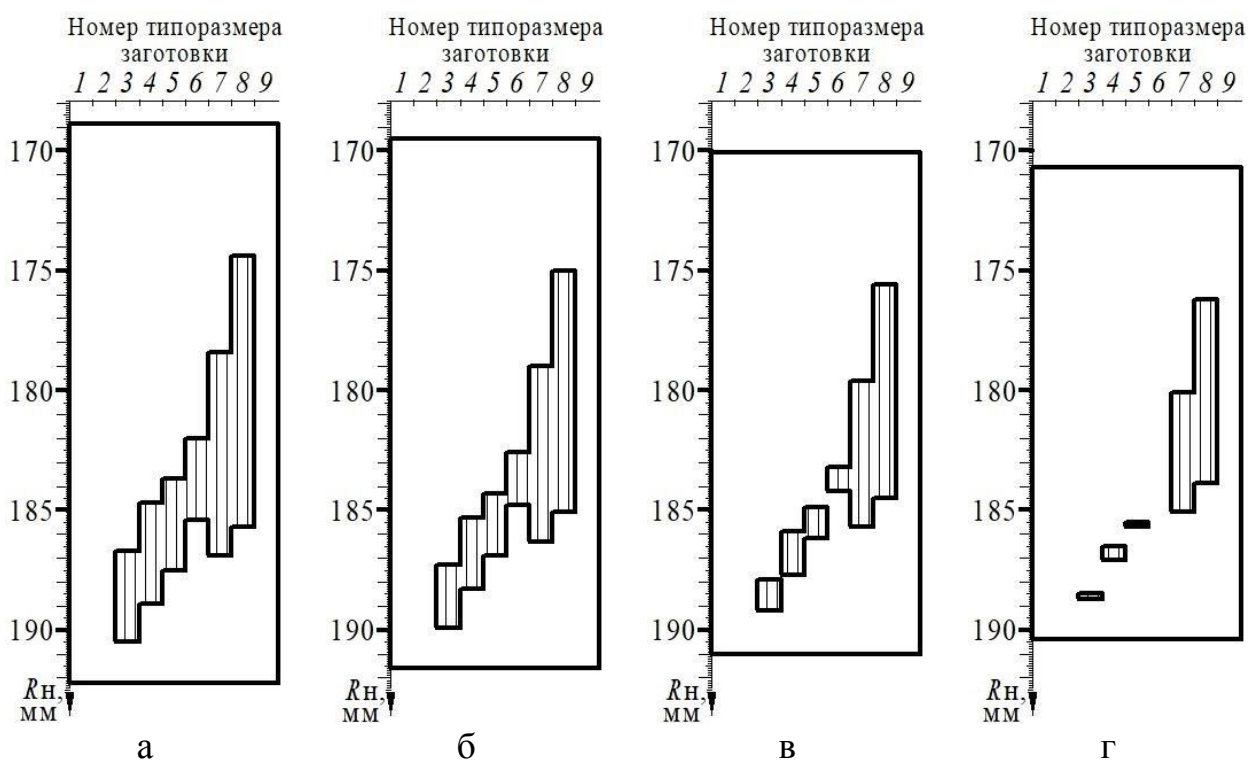


Рисунок 3. Диапазоны наладок положения крючка диаметром $d_{KP} = 10$ мм и допуском наладки:

а – $TR_H = 0$ мм; б – $TR_H = 1,2$ мм; в – $TR_H = 2,4$ мм; г – $TR_H = 3,6$ мм

В Глава 4 разработан и реализован метод оптимизации процесса наладки систем загрузки оборудования на основе варьирования состава наладочных работ и установления ограничений на варианты объединения заготовок в группы с целью минимизации затрат времени на наладку систем загрузки.

На Рисунке 4 показан граф связей, как модель формирования комплекта рекомендуемых наладок для рассматриваемого примера, между множествами типоразмеров заготовок ($n=9$), базовых наладок и ориентирующих элементов (крючков диаметром 4, 6, 8, 10, 12 мм).

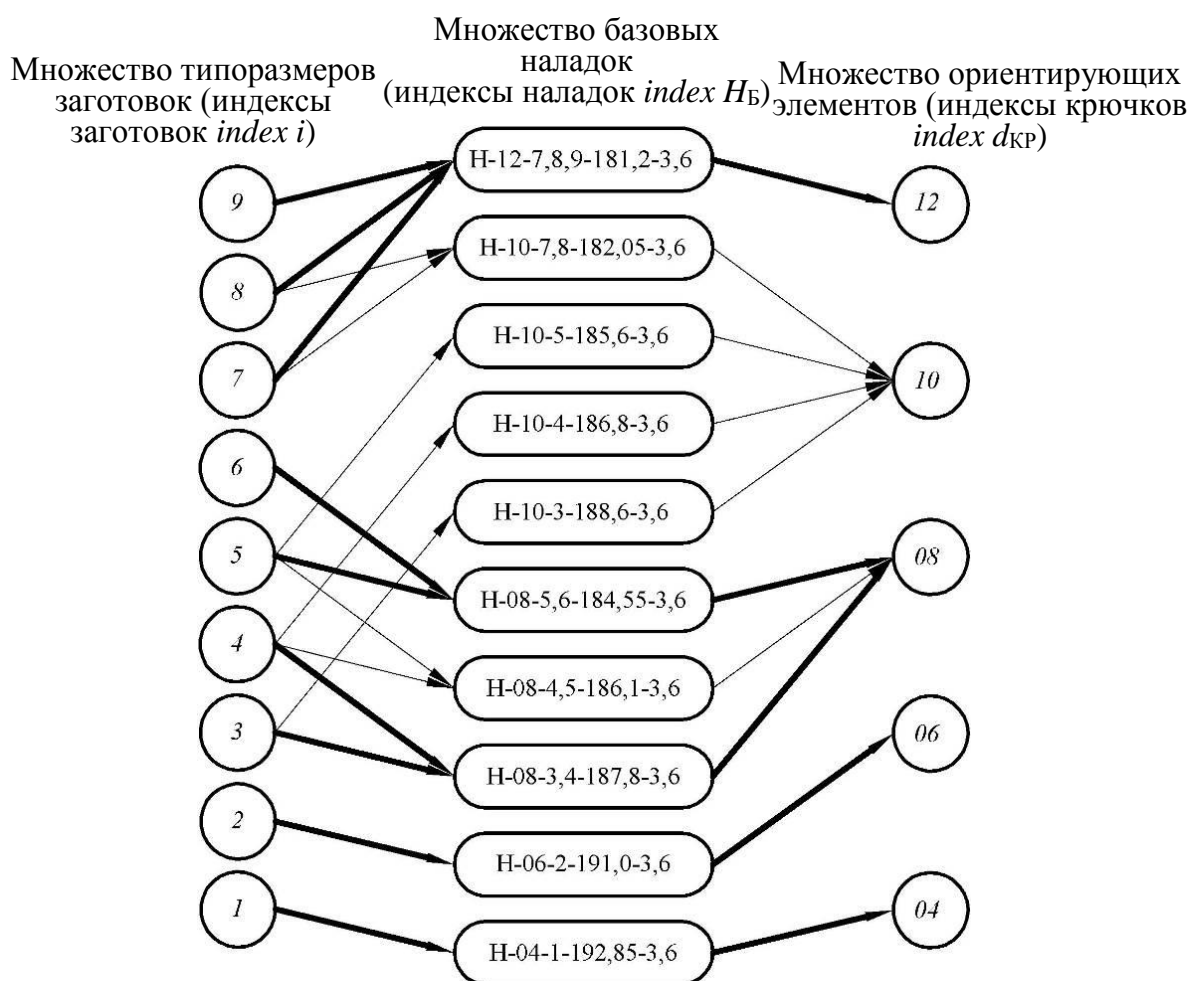


Рисунок 4. Граф связей между типоразмерами заготовок, базовыми наладками и комплектом ориентирующих элементов

Каждой базовой наладке из множества H_B присвоен индекс типа:

H-12-7,8,9-181,2-3,6 ,

где H – обозначение принадлежности индекса к параметрам наладки;

12 – значение диаметра крючка БОУ, мм (или индекс крючка);

7,8,9 – номера типоразмеров заготовок, которые могут быть ориентированы посредством этой наладки (или индексы заготовок);

181,20 – наладочный размер, мм;

3,6 – допуск на наладочный размер, мм.

Оптимизация, как процесс поиска экстремума целевой функции, представляет собой минимизацию затрат времени на групповую наладку системы загрузки $T_H^Г$:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_H^\Gamma = \left[\sum_1^{k_{\Pi n}} T_\Pi + \sum_1^{k_{3n}} T_3 \right] \rightarrow \min \\ H_V \subseteq H_B \\ k_{\Pi(i;H_V)} = \begin{cases} 1; \text{index } i \in \text{index } H_V \\ 0; \text{index } i \notin \text{index } H_V \end{cases} \\ k_{3(d_{\text{кр}};H_V)} = \begin{cases} 1; \text{index } d_{\text{кр}} \in \text{index } H_V \\ 0; \text{index } d_{\text{кр}} \notin \text{index } H_V \end{cases} , \\ k_{\Pi n} = \sum_1^{|H_V|} k_{\Pi(i;H_V)} \\ k_{3n} = \sum_1^{|H_V|} k_{3(d_{\text{кр}};H_V)} \\ i = \{1, 2, \dots, n\} \end{array} \right. \quad (4.1)$$

где T_Π – затраты времени на *изменение положения* одного комплекта ориентирующих элементов (крючков), мин;

T_3 – затраты времени на *замену* одного комплекта ориентирующих элементов (крючков), мин;

H_B – множество (комплект) базовых наладок;

H_V – множество (комплект) рекомендуемых наладок;

index H_V – индекс рекомендуемой наладки (положения ориентирующего элемента – крючка);

index i – индекс типоразмера заготовки;

index $d_{\text{кр}}$ – индекс размера ориентирующего элемента – крючка;

$k_{\Pi(i;H_V)}$ – характеристика наличия связи (необходимости использования) или отсутствия связи между рекомендуемой наладкой H_V и i -м типоразмером заготовки, соответственно $k_{\Pi(i;H_V)} = 1$ или $k_{\Pi(i;H_V)} = 0$;

$k_{3(H_V)}$ – характеристика наличия связи (необходимости использования) или отсутствия связи между рекомендуемой наладкой H_V и ориентирующим элементом размера $d_{\text{кр}}$, соответственно $k_{3(d_{\text{кр}};H_V)} = 1$ или $k_{3(d_{\text{кр}};H_V)} = 0$;

$k_{\Pi n}$ – суммарное количество рекомендуемых наладок – количество изменений положения ориентирующих элементов (крючков);

k_{3n} – суммарное количество ориентирующих элементов, используемых в рекомендуемых наладках, – количество замен ориентирующих элементов (крючков).

В ходе решения задачи оптимизации варьируется состав и количество наладочных работ:

- количество $k_{\Pi n}$ изменений положения ориентирующих элементов в ходе наладочных работ через варьирование состава комплекта рекомендуемых наладок, полностью определяющего количество настроек на размер R_H ;

- количество k_{3n} замен ориентирующих элементов через варьирование наличия связи между рекомендуемой наладкой и типоразмером заготовки, соответственно, полностью определяющих необходимость использования того или иного ориентирующего элемента $d_{кр}$.

В качестве ограничения принято, что каждый типоразмер заготовок обязательно должен быть задействован в одной из базовых наладок, но не более одного раза.

Количество возможных вариаций – конечно, характер связей описывается только булевыми переменными, поэтому возможно рассчитать целевую функцию для всех существующих вариантов и выбрать наименьшее значение, используя соответствующие программные инструменты ЭВМ.

Решение задачи оптимизации позволяет определить комплект рекомендуемых наладок, состав и количество наладочных работ, обеспечивающих минимальную трудоемкость групповой наладки, в соответствии с заданным значением допуска на наладку.

В Таблице 2 приведены некоторые результаты оптимизации, а также достигнутые значения трудоемкости групповых наладок по сравнению с индивидуальными.

Таблица 2.

Результаты оптимизации организации работы системы загрузки

Допуск на наладку, TR_H , мм		3,6	2,4	1,2
Состав наладочных работ	Количество изменений положения ориентирующих элементов (количество настроек на размер R_H) в ходе наладочных работ, $k_{\Pi n}$	5	5	4
	Количество замен ориентирующих элементов (крючков $d_{кр}$) в ходе наладочных работ, k_{3n}	4	3	3
Трудоемкость групповой наладки, $T_H^Г$, мин		51,4	46,0	44,9
Трудоемкость индивидуальной наладки, T_H , мин		106,2	110,2	118,2

В Главе 4 также установлена и формализована зависимость трудоемкости наладки систем загрузки оборудования от значений организационно-технических параметров систем загрузки, таких как состав и допустимая погрешность выполнения наладочных работ.

Эффективность принятого решения об организации групповой наладки можно оценить через отношение k трудоемкостей групповой наладки (планируемый вариант) и индивидуальной наладки (базовый вариант):

$$k = \frac{T_H^Г}{T_H} = \frac{\frac{T_П}{\left(\frac{TR_H^H}{TR_H^Б}\right)^{0,25}} k_{Пn} + T_3 \cdot k_{3n}}{\left(\frac{T_П}{\left(\frac{TR_H^H}{TR_H^Б}\right)^{0,25}} + T_3\right) \cdot n}, \quad (6)$$

где $T_H^Г$ и T_H – трудоемкости групповой (планируемый вариант) и индивидуальной (базовый вариант) наладок соответственно;

TR_H^H и $TR_H^Б$ – величины допусков на наладку по планируемому (новому) и базовому вариантам соответственно, мм.

Выполненные расчеты по данным, предоставленным Филиалом ООО «КЭЗ КВТ» в г. Калуге, позволили выявить зависимость общей трудоемкости наладки системы загрузки T_H от количества типоразмеров заготовок n и величины допуска на наладку TR_H (см. Рисунок 5). Использование разработанного в диссертационной работе группового подхода при организации наладки системы загрузки снижает суммарную трудоемкость наладки тем эффективнее, чем с меньшей погрешностью осуществляется наладка этих систем.

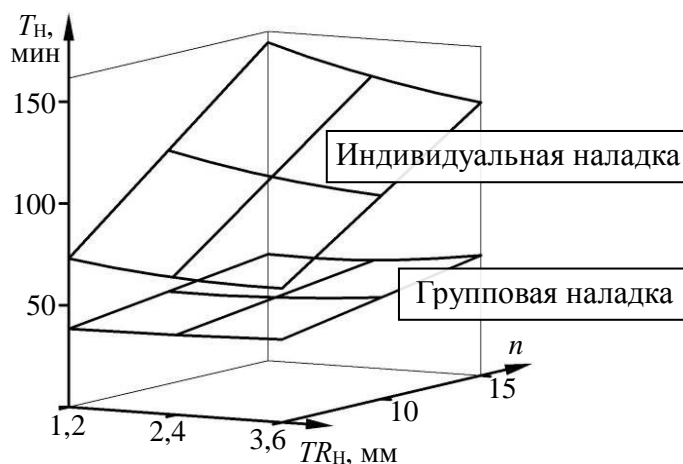


Рисунок 5. Зависимость общей трудоемкости наладки системы загрузки T_H от количества типоразмеров заготовок n и величины допуска на наладку TR_H

Процесс организации загрузки оборудования заготовками на основе группового метода представлен в работе в виде функциональной модели с применением инструментов методологии IDEF0 (см. Рисунок 6). Разработанная функциональная модель может быть реализована посредством информационных технологий в качестве автоматизированной системы организации групповой наладки систем загрузки оборудования, входящей в автоматизированную систему подготовки производства на предприятии.

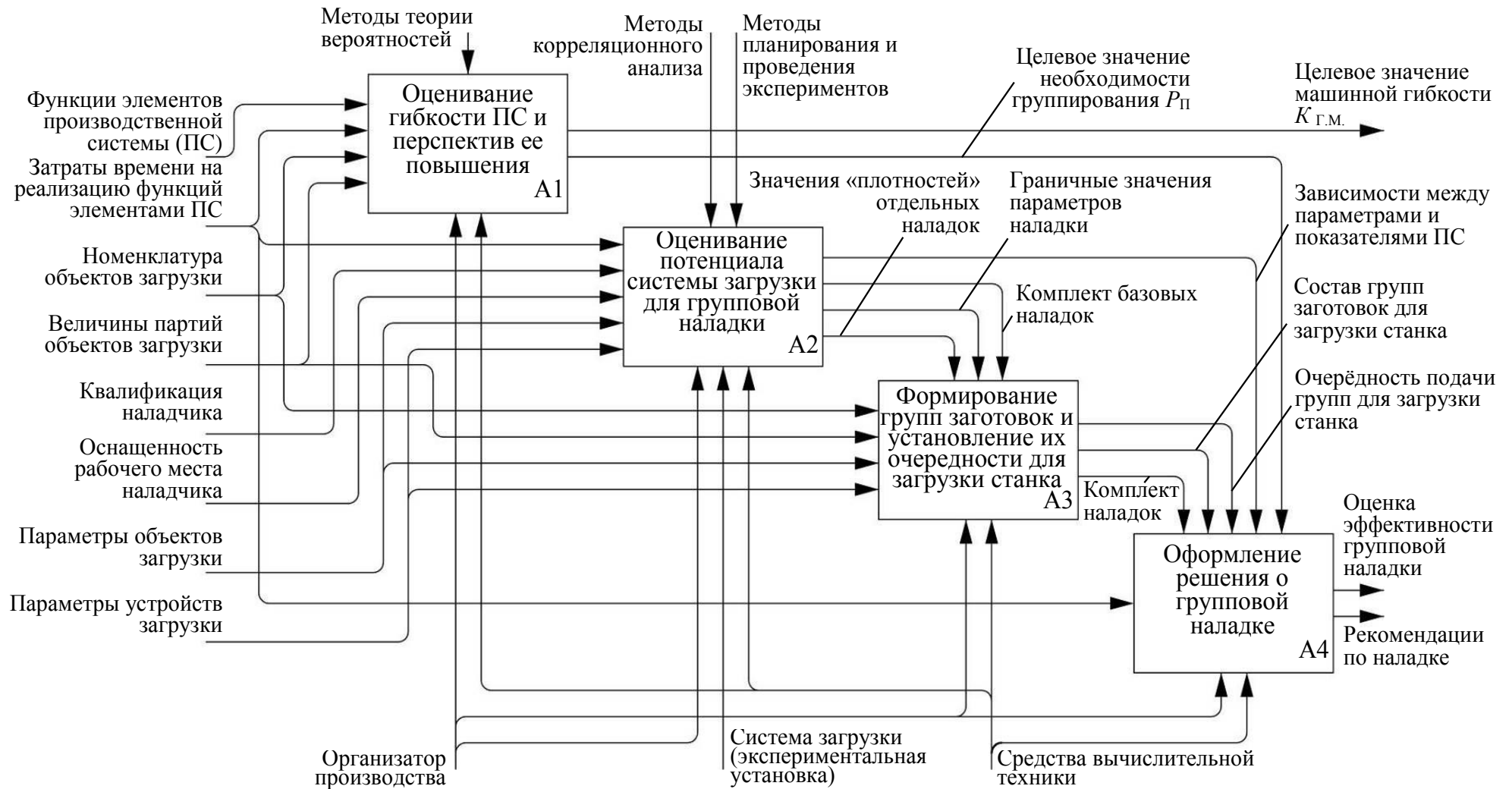


Рисунок 6. Функциональная модель процесса организации загрузки оборудования заготовками в многономенклатурном производстве на основе группового метода

Процесс организации загрузки оборудования заготовками в многономенклатурном производстве на основе группового метода можно разделить на четыре основных этапа, причем результаты каждого предыдущего этапа являются входными данными для последующих:

1. Оценивание гибкости производственной системы и перспектив ее повышения. Сущность этапа раскрыта в диссертации в Главе 2. Результатами этапа являются значения коэффициентов машинной гибкости и группирования.

2. Оценивание потенциала системы загрузки для групповой наладки с учетом существующих ограничений. Сущность этапа раскрыта в Главе 3. Результатами этапа являются: выявленные зависимости между параметрами и показателями производственной системы, граничные значения параметров наладки, значения «плотностей» отдельных наладок, комплект базовых наладок.

3. Формирование групп заготовок и установление их очередности для загрузки станка в заданных производственных условиях. Результатами этапа являются исследования Главы 4: состав групп заготовок для загрузки станка, оптимальные комплект наладок и состав наладочных работ, очередность подачи групп для загрузки станка.

4. Оформление решения о групповой наладке. Результатами этапа являются рекомендации и обоснование эффективности групповой наладки в соответствии с зависимостями, приведенными в Главе 4.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Анализ современной организации процесса загрузки оборудования заготовками в машиностроении показал высокую значимость группового метода наладки систем загрузки как инструмента совершенствования организации многономенклатурного производства. Установлено, что конструктивно значительная часть современных систем загрузки оборудования обладает потенциалом для организации групповой наладки.

2. Разработана и апробирована вероятностная модель работы многономенклатурной производственной системы с варьируемыми размерами партий изделий, позволяющая прогнозировать и оценивать эффективность организации наладки систем загрузки оборудования на основе группового метода. Моделирование, выполненное посредством разработанной модели, показало, что для системы, работающей при 100 типоразмерах загружаемых заготовок, переход загрузочных систем на групповую наладку снижает трудоемкость наладки систем загрузки на величину от 52 до 62 %, что подтверждает целесообразность организации работы таких систем на основе группового метода.

3. Сформирована система ограничений, влияющих на организацию работы систем загрузки оборудования в производственных условиях: конструктивные ограничения, связанные с геометрическими и физико-механическими параметрами систем и объектов загрузки, и организационно-технические

ограничения, связанные с составом и допустимой погрешностью выполнения наладочных работ.

4. Разработан и реализован метод оптимизации процесса наладки систем загрузки оборудования на основе варьирования состава наладочных работ и установления ограничений на варианты объединения заготовок в группы с целью минимизации затрат времени на наладку систем загрузки. Определены оптимальные значения параметров групповых наладок систем загрузки, обеспечивающие более чем двукратное снижение потерь времени на наладку по сравнению с индивидуальными наладками.

5. Установлена и формализована зависимость трудоемкости наладки систем загрузки оборудования от значений организационно-технических параметров систем загрузки, таких как состав и допустимая погрешность выполнения наладочных работ. Посредством полученных зависимостей установлено, что использование группового подхода при наладке систем загрузки, например, крючкового типа, снижает длительность производственного цикла изготовления продукции на величину от 4,2 до 10,4 % путем уменьшения требуемого количества переналадок по сравнению с индивидуальными наладками. Снижение происходит тем существеннее, чем с более высокой точностью осуществляется наладка. Соответственно, созданы условия для увеличения объема выпуска продукции такой производственной системой на величину от 4,2 до 12,7 %.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Калмыков В.В., Малышев Е.Н., Федоров В.А. Определение параметров групповой наладки крючковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройств // Автоматизация. Современные технологии. 2017. Т. 71, № 2. С. 51-54. (0,25 п.л. / 0,14 п.л.)

2. Федоров В.А., Малышев Е.Н., Малышев И.Е. Исследование эффективности гибких производственных систем методом статистических испытаний Монте-Карло // Технология машиностроения. 2019. № 1. С. 64-68. (0,31 п.л. / 0,22 п.л.)

3. Федоров В.А., Калмыков В.В., Малышев Е.Н. Применение крючковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройств в многономенклатурном сборочном производстве // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. № 10. С. 446-448. (0,19 п.л. / 0,15 п.л.)

4. Федоров В.А., Малышев Е.Н., Ильчев В.Ю. Сокращение трудоемкости переналадки транспортно-загрузочных устройств на основе группового метода // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2020. № 10. С. 456-459. (0,25 п.л. / 0,16 п.л.)

5. Malyshev, E.N. Zenkina, I.A. Fedorov, V.A. The statistical researches of flexible manufacturing system's efficiency // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Volume 483, Issue 1, 20 March 2019, DOI: 10.1088/1757-

899X/483/1/012023. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/483/1/012023>. (0,32 п.л. / 0,25 п.л.)

6. Малышев Е.Н., Калмыков В.В., Федоров В.А. 77-48211/480037 Графоаналитический метод формирования сменных комплектов рабочих элементов штыревых бункерно-загрузочных устройств // Инженерный вестник. 2012. № 10. С. 13. (0,37 п.л. / 0,17 п.л.)

7. Малышев Е.Н., Федоров В.А. Определение геометрических параметров элементов загрузочных устройств в многономенклатурном производстве // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции (Стерлитамак, 08 сентября 2018 г.). Стерлитамак: АМИ, 2018. С. 12-15. (0,19 п.л. / 0,16 п.л.)

8. Федоров В.А. Анализ конструкций станочных загрузочных устройств как объектов гибкой автоматизации // Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции, 13 – 15 ноября 2018 г. Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. Т. 1. С. 7-10. (0,25 п.л.)

9. Федоров В.А., Малышев Е.Н. Структура гибкости технологических систем // Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы научно-технической конференции, 19 – 21 ноября 2019 г. Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. Т. 1. С. 35-36. (0,13 п.л. / 0,10 п.л.)

10. Федоров В.А., Малышев Е.Н. Применение групповых методов при организации бережливых производств в машиностроении // Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы научно-технической конференции, 17 – 19 ноября 2020 г. Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. Т. 1. С. 37-38. (0,13 п.л. / 0,10 п.л.)

11. Федоров В.А. Реализация метода SMED в многономенклатурном производстве // Инновационные технологии, экономика и менеджмент в промышленности: Сборник научных статей II международной научной конференции, 19 февраля 2021 г. Волгоград: ООО «Конверт», 2021. С. 196-198. (0,14 п.л.)