

На правах рукописи

Николаева Наталия Семеновна

**МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ
МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ НА
ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ ТИПОРАЗМЕРНЫХ РЯДОВ**

Специальность 2.5.5.

Технология и оборудование механической и
физико-технической обработки

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук



Москва – 2025 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» (Национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

**Научный
руководитель:**

Утенков Владимир Михайлович
доктор технических наук, профессор

**Официальные
оппоненты:**

Мнацаканян Виктория Умедовна
доктор технических наук, профессор
кафедры горного оборудования, транспорта
и машиностроения ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский
технологический университет «МИСИС»

Шлаев Кирилл Иванович

кандидат технических наук, начальник
конструкторского бюро Головного центра
компетенций станкоинструментальной
промышленности, созданной на базе
ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

**Ведущая
организация:**

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Пензенский государственный
университет»

Защита состоится «___» _____ 2026 года в ____ часов ____ мин. на заседании диссертационного совета 24.2.331.02 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим высылать по указанному адресу.

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

Телефон для справок: 8 (499) 263-66-33, доб. 36-28.

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

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



А.В. Богданов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие техники и технологии производства приводит к изменению всей номенклатуры производимых изделий, и, в связи с этим, к увеличению спроса на новые изделия. Увеличение номенклатуры изготавливаемых изделий требует разработки и создания новых типоразмерных рядов (типажей, гамм) металлорежущих станков, что позволит повысить технико-экономическую эффективность автоматизированной системы технической подготовки производства и указывает на необходимость проведения исследований в данном направлении и актуальность исследования.

Существующие на сегодняшний день типоразмеры станков построены зачастую эмпирически, методами экспертных оценок, где потребности современного рынка отражены не достаточно полно. В настоящее время требуется научно обоснованный дифференцированный подход к поиску оптимальных значений параметров металлорежущих станков. Решение задачи оптимизации типоразмерных рядов изделий станкоинструментальной промышленности повысит конкурентоспособность производства металлорежущих станков.

Указанная задача далека от своего завершения, о чем свидетельствуют разработанная и утвержденная Распоряжением Правительства РФ от 05.11.2020 № 2869-р «Стратегии развития станкоинструментальной промышленности на период до 2035 года», что и подтверждает актуальность рассматриваемой задачи исследования.

Степень разработанности темы. Оптимизации типоразмерных рядов посвящены труды ученых Цыпкина Я.З., Каца Г.Б., Антипенко В.С., Базрова Б.М., Дашенко А.И. Иванова А.В., Дабагына А.В., Дементьева В.Т., Комарова Д.М., Ткаченко В.В. и других. Большое количество опубликованных работ в технической литературе по данному вопросу указывает на актуальность исследования.

На начальных этапах построения типоразмерных рядов использовались эмпирические ряды предпочтительных чисел, методы перебора вариантов, теории графов, методы линейного и динамического программирования и их модификации и т.д., что свидетельствует о сложности и актуальности поиска решения задачи оптимизации и необходимости проведения дальнейших исследований.

Учитывая неопределенность априорной информации многие авторы используют вероятностные методы для решения задач оптимизации. В диссертационном исследовании автором предложен адаптивный метод для оптимизации типоразмерного ряда металлорежущих станков.

Целью диссертационного исследования является повышение эффективности машиностроительных производств методом автоматизированного расчета параметров металлорежущих станков при их проектировании на основе формирования оптимальных типоразмерных рядов металлорежущих станков с учетом данных о совокупной стоимости владения станками на всем из жизненном цикле (на этапах проектирования металлорежущих станков, производств, технической подготовки производств и в процессе эксплуатации).

В соответствии с целью работы сформулированы следующие **задачи диссертационного исследования**:

- определить роль и место выбора параметров металлорежущих станков в процессе их проектирования на основе оптимизации типоразмерных рядов;
- установить функциональные взаимосвязи между значениями технических и экономических параметров и показателей металлорежущих станков;
- разработать математическую модель типоразмерного ряда металлорежущих станков, сформировать критерий и построить методику оптимизации;
- разработать метод автоматизированного расчета параметров металлорежущих станков на основе оптимизации типоразмерных рядов;
- разработать вычислительную процедуру и программную реализацию идентификации оптимального типоразмерного ряда;
- провести вычислительный эксперимент по оптимизации значений типоразмерного ряда металлорежущих станков и осуществить экспериментальные исследования.

Объектом исследования является однородная группа металлорежущих станков.

Предметом исследования являются теория и практика проектирования и эксплуатации станков, методы построения перспективных типоразмерных рядов изделий станкостроения, свойства описывающих их функций и функционалов, стохастические математические модели, критерии, разработка методов оптимизации критериев и их программная реализация.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- установлены роль и место процесса оптимизации типоразмерных рядов при формировании технических требований к проектируемым металлорежущим станкам;
- обоснован выбор показателей и функций, характеризующих значения параметров типоразмерных рядов металлорежущих станков;
- разработана модифицированная методика оценивания стоимости владения металлорежущим станком, как технико-экономическая характеристика значений членов типоразмерных рядов;
- построена стохастическая технико-экономическая модель, критерий оптимизации типоразмерного ряда металлорежущих станков;
- разработан метод автоматизированного расчета параметров металлорежущих станков при проектировании на основе построения стохастических алгоритмов и соответствующего программного комплекса (на основе современных методов информационных технологий).

Теоретическая значимость работы заключается в анализе и разработке теории оптимизации стохастических типоразмерных рядов изделий станкостроения, в разработке автоматизированного управления процессами формирования перспективных типоразмерных рядов в условиях выполнения полностью планируемых объемов работ по обработке заготовок.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

Осуществлена формализация процесса формирования технических требований к металлорежущим станкам и в нем определено место задачи

оптимизации типоразмерного ряда металлорежущих станков (токарных, фрезерных, сверлильных, расточных, шлифовальных групп, а также для создаваемых в настоящее время станков с параллельной кинематикой, и станков, построенных по модульной технологии) с учетом текущих потребностей.

Предложенные в работе методы оптимизации типоразмерных рядов и разработанный программный комплекс могут быть применены при создании автоматизированной системы управления станкостроительной отрасли, а также при принятии решения о выборе металлорежущих станков при заданных объемах деталей различной номенклатуры.

Для группы токарно-карусельных станков рассчитан оптимальный типоразмерный ряд главного параметра с учетом заданной потребности в среднесрочном периоде. Рассчитан экономический эффект от использования оптимизированного типоразмерного ряда токарно-карусельных станков в сравнении с рядом, представленным на рынке РФ, который составил 6,1%.

Научные результаты, полученные в диссертационном исследовании, предназначены для использования научно-исследовательскими и конструкторскими подразделениями, при технико-экономическом анализе производимых и создаваемых станков, в учебном процессе и при подготовке специалистов станкостроительной отрасли.

Методы исследования. При выполнении исследования использовались основные положения системного анализа, теории автоматического управления, теории обучающихся систем, теории идентификации, теории дискретных систем, итеративных методов, теории алгоритмов, теории статистических решений, функционального анализа и технологии машиностроения.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Выбранные технико-экономические параметры металлорежущих станков.
2. Разработанный модифицированный метод оценивания стоимости владения металлорежущим станком на полном жизненном цикле на основе технико-экономических параметров.
3. Разработанный метод автоматизированного расчета параметров при проектировании металлорежущих станков на основе оптимизации типоразмерных рядов.
4. Разработанная стохастическая математическая модель типоразмерного ряда металлорежущих станков.
5. Результаты экспериментального исследования по определению значений оптимизируемых типоразмерных рядов токарно-карусельных станков.

Достоверность научных результатов основывается на методах математического моделирования, системного анализа, теории автоматического управления, теории обучающихся систем, теории идентификации, теории дискретных систем, итеративных стохастических методов, теории алгоритмов, теории статистических решений, функционального анализа, проектирования металлорежущих станков, технологии машиностроения, использовании статистической информации, разработанных и апробированных технико-экономических показателей.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на международных и Всероссийских конференциях и семинарах: V Молодежная научно-техническая конференция «Взгляд в будущее–2007». ФГУП «ЦКБ МТ «Рубин». СПб., 2007; Четвертая международная научно-практическая конференция «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». СПб., 2007; XIX Всероссийская научно-практическая конференция «Безопасность движения поездов». МИИТ. М., 2018; Научно-техническая конференция «Состояние, проблемы и перспективы создания корабельных информационно-управляющих комплексов». АО «Концерн «Моринсис-Агат». М., 2019; Международная молодежная научно-техническая конференция «Аэрокосмические технологии», посвящённая 105-летию со дня рождения академика В.Н. Челомея. Реутов, 2019; Научно-технический семинар «Информационно-управляющие системы (алгоритмы, схемотехника, конструкции)» в АО «Концерн «Моринсис-Агат». М., 2019; II Международная научно-исследовательская конференция «Научно-технический и социально-экономический потенциал развития общества». Саратов, 2021; 79 Международная научно-методическая и научно-исследовательская конференция МАДИ. М., 2021; VII Всероссийская научно-практическая конференция «Системы управления жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении: современные вызовы, новые источники роста». МГТУ им. Н.Э. Баумана. М., 2024; Международная конференция REEPE «Proceedings of the 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering», Россия, Индия, Египет. МЭИ. М., 2024; IV Всероссийская научно-практическая конференция молодых специалистов: «Системы управления полным жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении: критические вызовы, переосмысление задач и их решений». МГТУ им. Н.Э. Баумана. М., 2024; Международная конференция REEPE «Proceedings of the 2025 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering», Россия, Египет, ОАЭ. МЭИ. М., 2025; VIII Всероссийская научно-практическая конференция «Системы управления полным жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении: критические вызовы, новые источники роста». МГТУ им. Н.Э. Баумана. М., 2025.

Публикации: Основные положения диссертации опубликованы в 23 научных работах, в том числе 13 публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК РФ; 3 статьи входящих в систему цитирования Scopus, и получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, общим объемом 10,98 п.л. / 6,94 п.л.

Личный вклад автора заключается в выборе цели и задач исследования, анализе и обосновании выбора данных о технико-экономических функциях, выборе технико-экономических функций и показателей, разработке модифицированной методики расчета совокупной стоимости владения металлорежущим станком, метода автоматизированного расчета параметров при проектировании металлорежущих станков на основе оптимизации типоразмерных рядов, построение критерия и метода оптимизации, разработка

программы проведения экспериментальных исследований и обработке результатов, выявления математических зависимостей.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и заключения, списка литературы из 225 наименований и приложения. Общий объем работы составляет 156 страниц машинописного текста, 11 рисунков и 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, основные положения, выносимые на защиту.

Для повышения эффективности на стадиях проектирования металлорежущих станков, уточнения роли и места диссертационного исследования в проектировании, разработан алгоритм «Формирование требований к проектированию металлорежущих станков» (Рисунок 1).

Оптимизируя типоразмерные ряды металлорежущего станка получаем оптимальное значение типоразмера, с учетом которого формируется рабочее пространство металлорежущего станка. Управление значениями главного параметра в ряду позволяет сократить материальные, трудовые затраты на проектирование, производство и на эксплуатацию проектируемого оборудования.

В **Главе 1** приведен анализ состояния вопроса построения типоразмерных рядов, рассмотрены существующие методы построения типоразмерных рядов металлорежущих станков (Рисунок 2).

Типоразмерные ряды разрабатываются с целью оптимального удовлетворения требований как изготовителей, так и потребителей металлорежущего оборудования в части его технологических возможностей, технических характеристик и экономических показателей, с учетом технологических возможностей, технических характеристик, экономических показателей.

При этом следует иметь в виду, что необоснованное расширение номенклатуры выпускаемых станков, сходных по своему назначению и отличающихся только конструктивным исполнением, приводит к уменьшению серийности выпуска, возрастанию себестоимости и цены станков, повышенными расходами на их эксплуатацию.

Ранее типоразмерные ряды металлорежущих станков строились по принципу геометрической прогрессии, в которой главный параметр станка является членом геометрического ряда, без строгого научного обоснования, в нем потребности рынка отражены усреднено, тогда как время требует научно-обоснованного дифференцированного подхода с учетом фактического распределения потребностей в металлорежущих станках различного предназначения. Например, главный параметр токарно-карусельных станков – наибольший диаметр изделия, а знаменатель размерного ряда – $\sqrt[3]{2}$.

В основном размер рабочей зоны выбирается исходя из размеров изготавливаемой детали, но каждый конструктор металлорежущего станка хочет сделать станок с рабочей зоной как можно большей, при этом увеличение рабочей зоны приводит к увеличению стоимости изготовления станка.



Рисунок 1. Формирование технических требований к проектируемым металлорежущим станкам

В опубликованных работах посвященных оптимизации типажей не достаточно полно учитывают ряд показателей и задача выбора технико-экономических функций и критериев, с достаточной полнотой характеризующих металлорежущие станки, далека от своего завершения и нуждается в дальнейшей разработке, а возрастание роли экономических показателей указывает на необходимость решения задачи повышения эффективности (конкурентоспособности) производства изделий современного машиностроения. Анализ работ по оптимизации типоразмерных рядов показал,

что предлагаемые методы оптимизации опираются на сравнительно узкий набор экономических функций, не всегда учитывается стохастичность априорной информации о характере потребности в тех или иных типоразмерах станков. Обычно предлагаются упрощённые математические модели оптимизации значений типоразмерных рядов.

Возникла необходимость в построении более широкого набора технико-экономических функций и учета стохастичности априорной информации о распределении требуемых искомых значений типоразмеров, что позволит построить более адекватные реальным условиям модели типажей, повысить конкурентоспособность номенклатуры выпускаемых металлорежущих станков.

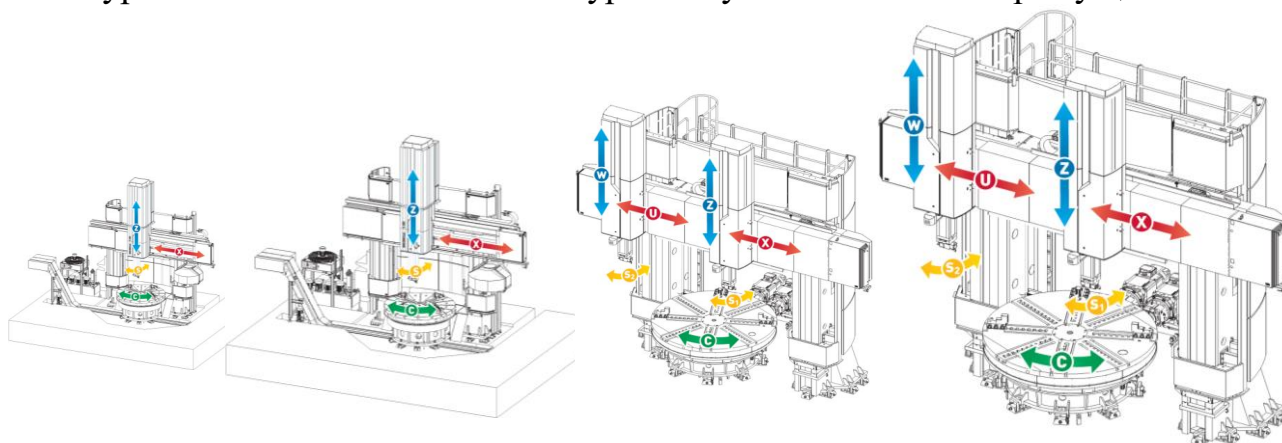


Рисунок 2. Типоразмерный ряд токарно-карусельных станков

В результате приведенного в Главе 1 анализа поставлена цель и сформулированы задачи исследования, определена их научная новизна.

В **Главе 2** разработаны методологические принципы формирования математической модели типоразмерного ряда металлорежущих станков.

Металлорежущий станок – это сложное техническое устройство, характеризующееся большим набором параметров. Модель, учитывающая все основные параметры, исключительно громоздка, и приводит к задаче с огромным числом переменных, что делает практически невозможным решение задачи оптимизации стохастического критерия указанного типа. В качестве первого приближения используем один определяющий главный параметр. Но даже в этом случае, приходится решать многомерную задачу с нелинейным стохастическим критерием при априори не известных функциях плотностей распределения вероятностей (ФПРВ) спроса. Выбор параметра (параметров) должен быть обоснованным, для этого следует провести предварительную классификацию всего множества параметров рассматриваемых металлорежущих станков.

В настоящее время современная экономическая наука предлагает универсальный метод интегральной оценки затрат по приобретению и владению материальными объектами. Это метод основан на использовании критерия под названием «Total Cost of Ownership» (TCO) – «совокупная стоимость владения». В работе был предложен модифицированный метод расчета совокупной стоимости владения металлорежущим станком. Данный метод, дополненный прогнозными характеристиками на пять лет и

привязанный к самой структуре металлорежущего станка, делает технико-экономическую функцию более адекватной реальным условиям.

Под стоимостью владения понимается суммарная величина расходов, которые несет владелец в течение срока его целевого использования. Совокупная стоимость владения оборудованием и в частности металлорежущим является важной технико-экономической характеристикой. Этот показатель отражает эффективность использования оборудования и во многих случаях играет определяющую роль при непосредственном осознанном выборе модели металлорежущего станка для решения необходимых производственных задач.

Стоимость владения металлорежущим станком (1) представляет собой сумму расходов, которые несет владелец в течение цикла владения металлорежущим станком, за вычетом стоимости металлорежущего станка и других расходов, возмещаемых при выходе из состояния владения, например, при последующей продаже:

$$TCO_{Mi} = P_{Mi} - C_{Mi\text{возм}}, \quad (1)$$

где TCO_{Mi} - стоимость владения, руб.; Mi - металлорежущий станок с индексом i ; P_{Mi} - расходы на владение (в этот показатель входит цена покупки станка), руб.; $C_{Mi\text{возм}}$ - возмещенная стоимость металлорежущим станком (возмещенная стоимость, например, после продажи станка), руб.

Цикл владения металлообрабатывающим оборудованием ограничен во времени моментом начала реализации вступления в состояние владения металлообрабатывающим оборудованием и моментом выхода из состояния владения. Расходы, возникающие за во время цикла владения можно разделить на группы расходов: на вступление в состояние владения $P_{вв}$; на эксплуатацию $P_{э}$; на выход из состояния владения $P_{вых}$. Суммарные расходы за указанный период жизненного цикла на владение металлообрабатывающим оборудованием представляют собой сумму всех расходов, возникающих за время владения.

Металлорежущий станок на данный момент представляет собой многокомпонентную структуру со сложными взаимосвязями составляющих элементов. Разнообразие станков велико, они отличаются компоновками, выполняемыми функциями и размерами. Но их объединяет общее свойство: любой станок можно рассматривать как систему, состоящую из множества упорядоченных и метрически связанных конструктивно подобных элементов, находящихся в определенных функциональных взаимодействиях. В общем виде математическую модель любого типоразмерного ряда станков можно построить с помощью так называемой удельно весовой функции (УВФ), отражающей структуру спроса на элементы типоразмерного ряда станков.

С появлением новых технологий, с увеличением номенклатуры деталей возникает необходимость пересмотра структуры типоразмерного ряда. Научный подход требует решения задачи оптимизации значений размерных рядов металлорежущих станков и оборудования как элементов логистики. Совокупность технических T и экономических $\mathcal{E}$ показателей позволяет построить целевую функцию F (целевой функционал) (2). Целевая функция, описывающая металлорежущие станки должна отражать технические

характеристики станка и экономический эффект от его применения в зависимости от количества операций используемых станком. Оптимальный размерный ряд – ряд для которого целевая функция достигает минимума:

$$F(T, \Theta) \rightarrow \min. \quad (2)$$

Математическая задача автоматизации управления процессами формирования типоразмерным рядом металлорежущих станков формируется следующим образом: требуется установить количество членов ряда N и автоматизировать процесс оптимизации значений ряда Q_k , для всех рассматриваемых N , где $k \in \{1, N\}$, выбранного параметра оптимизации по заданному диапазону таким образом, чтобы минимизировать величину целевого функционала (2), построенного из технико-экономических функций, характеризующих изделия, при условии выполнения запланированного объема работ. Другими словами, оптимальный типоразмерный ряд должен обеспечивать выполнение всех планируемых объемов работ полностью за время жизни металлорежущего станка с минимальными затратами.

Целевая функция должна учитывать так называемые затраты на адаптацию, то есть затраты, возникающие из несовпадения требуемых параметров станков и предлагаемых. Тем самым, повышается конкурентоспособность производства изделия. Это типичная задача внутренней логистики связывающей материальные потоки (детали, станки) с экономическими потоками (затраты на производство, реновацию, экологию, зарплату и т.п.) за время жизни металлорежущего станка.

Одним из основных параметров, влияющих на ТСО, является главный параметр металлорежущего станка – q . Введем для первого слагаемого (1) новое обозначение – $f(q)$ и аппроксимируем его путем разложения по системе ортогональных функций (по полиномам Чебышева). Ограничиваясь конечным числом членов разложения получаем:

$$TCO_{Mi} = f(q) = \sum_{i=1}^n c_i(q), \quad (3)$$

где c_i – коэффициенты аппроксимации по системе ортогональных полиномов.

Тогда технико-экономическая функция для одного члена ряда принимает вид:

$$f_i(q) = f_{1i}(q) + f_{2i}(q)B^{-z}(q), \quad (4)$$

где i – номер члена ряда; $B(q)$, шт – программа выпуска образца со значением параметра q ; z – показатель степени, отражающий технологию производства.

Или, применяя формулу (4) к членам типоразмерного ряда $Q_1 \leq Q \leq Q_N$ получаем:

$$f_k(Q_k, B_k) = f_{1k}(Q_k) + f_{2k}(Q_k)B_k^{-z}. \quad (5)$$

Таким образом функция удельных затрат (5) для искомых оптимизируемых значений Q_k - члена типоразмерного ряда с номером k , получается из (5) заменами: $q \rightarrow Q_k$, $B(q) \rightarrow B_k$ и $f(q)$ на $f_k(Q_k, B_k)$, где в f_{1i} , f_{2i} подставляются значения Q_k вместо q ; в $f_{1k}(q)$, $f_{2k}(q)$ - функции, не зависящие от

программы выпуска B ; z – зависит от технологии изготовления металлорежущего станка.

Таким образом, требуется для числа членов ряда N автоматизировать процесс оптимизированных значений параметров Q_k для всех $N_{\min} \leq N \leq N_{\max}$, так, чтобы минимизировать величину целевого функционала (2), построенного из технико-экономических функций, характеризующих металлорежущий станок, при условии выполнения запланированного объема работ с минимальными затратами.

В работе предлагается критерий оптимизации целевой функции типоразмерных рядов металлорежущих станков. Целевой функционал должен отражать основные виды затрат: S_N на производство и эксплуатацию металлорежущих станков значения главного параметра, которого образует типоразмерный ряд

$$S_N = \sum_{k=1}^N f_{1k} B_k + \sum_{k=1}^N f_{2k} B_k^{1-z}, \quad (6)$$

и затраты на адаптацию предлагаемого типоразмерного ряда в целом R_N к распределению спроса:

$$R_N^2 = \sum_{k=1}^N B_k^2(Q_{k-1}, Q_k) \int_{Q_{k-1}}^{Q_k} [S_k(Q_k, B_k(Q_{k-1}, Q_k)) - S_q(q, B(q))]^2 d\mu(q), \quad (7)$$

где $d\mu(q)$ – функция плотности распределения вероятностей (ФПРВ) требуемых значений q по диапазону изменения параметров (a, b) . Окончательно целевой функционал принимает вид:

$$F_N = S_N + R_N \longrightarrow \min, \quad \begin{matrix} a \leq q, Q_k \leq b, \\ Q_1 < Q_2 < \dots < Q_N, \\ N_{\min} \leq N \leq N_{\max} \end{matrix} \quad (8)$$

при наличии указанных ограничений на значения соответствующих переменных. В (8) $N_{\min}$, $N_{\max}$ – устанавливаются экспертным путем, S_N – стоимость всех станков значения главного параметра которых образуют типоразмерный ряд членов ряда, R_N – затраты на адаптацию типоразмерного ряда в целом к спросу – от несовпадения спроса q и предложения Q_k .

В процессе вычисления осуществляется перебор по всем N из указанного диапазона и в качестве оптимального выбирается ряд с наименьшим значением критерия (8) для N^* принимаемого в качестве оптимального числа членов ряда.

Таким образом, устанавливается оптимальное значение числа членов ряда N^* и отвечающие выбранному N^* оптимальные значения Q_k^* и соответствующие им B_k .

Оценку затрат на адаптацию получаем с помощью алгоритмов стохастической аппроксимации:

$$R_k^2[n+1] = R_k^2[n] - \Gamma[n+1] \left\{ \sum_{k=1}^N B_k^2[n] [S_k[n] - S[n+1]]^2 E_{\Omega_k}[n+1] - R_k^2[n] \right\}, \quad (9)$$

$R_N = \sum_{k=1}^N R_k$, где $E_{\Omega_k}[n+1] = 1$ при $q[n+1] \in \Omega_k[n]$ и $E_{\Omega_k}[n+1] = 0$ при $q[n+1] \notin \Omega_k[n]$, где $\Delta \Omega_k = Q_k - Q_{k-1}$ – интервал, $Q_{k-1} < q \leq Q_k$, $\Gamma[n+1]$ – коэффициенты

влияющие на характер и скорость сходимости рекуррентных соотношений (9), n – номер шага вычислений.

В исследовании была проанализирована функция УВФ – в общем случае нелинейная и невыпуклая, ФПРВ требуемого значения априори не известна и не известны ее параметры. Поэтому, критерий (2) состоящий из УВФ и ФПРВ с указанными свойствами делает практически невозможным применение аналитических методов. Оценку искомых оптимизируемых значений удастся получить используя приближенные алгоритмы стохастической аппроксимации.

Глава 3 посвящена непосредственно разработке метода автоматизированного расчета параметров металлорежущих станков на основе оптимизации типоразмерных рядов. Оптимизация осуществляется решением задачи с многими переменными, с нелинейными, в общем случае невыпуклыми функциями и функционалами.

Предлагается оценивать искомые оптимальные значения с помощью алгоритмов стохастической аппроксимации, состоящего из нескольких частей.

Оценивание оптимальных значений главного параметра из рекуррентных соотношений для оценки значений Q_k , $k = 1 \div (N - 1)$:

$$Q_k[n+1] = P_{1k} \{ Q_k[n] - \gamma[n+1] \tilde{V}_k(Q_{k-1}[n], Q_k[n], B_k(Q_k[n], Q_{k+1}[n], q[n+1], B(q[n+1])) \}, \quad (10)$$

где n - номер итерации, $n = 0, 1, 2, 3, \dots$; P_{1k} - проектирующий оператор, обеспечивающий выполнение ограничений в процессе вычислений по принципу сжатых отображений.

Объемы выпуска B_k вычисляются из условия удовлетворения спроса Q_{k-1} , Q_k :

$$B_k(Q_{k-1}, Q_k) = W^{-1}(Q_k) B_{\Sigma} \int_{Q_{k-1}}^{Q_k} W(q) d\mu(q), \quad (11)$$

где функция $W(q[n]), W(Q_k[n])$ - производительность, считается известной или устанавливается методом структурной минимизации эмпирического риска или устанавливается из соотношений; B_{Σ} - нормировочная константа; $d\mu(q)$ - дифференциал.

Достаточные условия сходимости коэффициента $\gamma_k[n]$ в адаптивных алгоритмах имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} 0 < \gamma_i[n] < \gamma_0(a, \beta) \\ \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_v[n] \Rightarrow \infty \\ (a + \beta) \sum_{n=1}^{\infty} \gamma^2[n] < \infty \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

где α, β - коэффициенты, учитывающие хаотичность априорной информации и характер роста целевого функционала.

Оценивание потерь от несовпадения предлагаемых и требуемых типоразмеров металлорежущих станков осуществляется с помощью рекуррентного соотношения:

$$R_N^2[n+1] = R_N^2[n] - \gamma_3[n+1] \left\{ \sum_{k=1}^N B_k^2[n] \times [S_k[n] - S[n+1]]^2 E_{2k}[n+1] - R_n^2[n] \right\}. \quad (13)$$

Применение адаптивных алгоритмов позволило решить задачу оптимизации ряда в случае стохастической постановки задачи, при случайном характере функций спроса; получить решение в условиях неполной априорной информации относительно ФПРВ; сократить трудоемкость предварительной обработки статистической информации, ввиду отсутствия необходимости определения функции распределения применяемости номиналов ряда.

Стохастичность и нелинейность критериев практически исключает применение аналитических методов поиска экстремумов, в общем случае – многоэкстремальной задачи. В критериях выделены два вида затрат, проведен их сравнительный анализ и учет их влияния на сходимость дискретных алгоритмов оптимизации для предложенного автором расширенного (реального) класса технико-экономических функций.

Разработан программный комплекс поиска экстремальных значений параметрических рядов (Рисунок 3) с использованием современных методов информационных технологий. Программный комплекс оптимизации типоразмерного ряда металлорежущих станков реализован на современном языке программирования Python 3.8 с использованием библиотеки для создания статистических графиков Seaborn.

Получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ на программный комплекс «Формирование оптимальных типоразмерных рядов металлорежущих станков» № 2025610954 от 16.01.2025.

Глава 4 посвящена применению результатов исследования. Были рассмотрены ряды токарно-карусельных станков (Рисунок 2). На данных станках можно выполнять внутреннее и наружное цилиндрическое и коническое растачивание и обтачивание, торцовое точение, сверление, зенкерование и развертывание отверстий в центре деталей, нарезать резьбу. Используемый ранее метод построения рядов токарно-карусельных станков, по принципу геометрической прогрессии, в которой главный параметр – наибольший диаметр изделия, а показатель ряда $\sqrt[3]{2}$, с учетом ряда предпочтительных чисел определял следующий размерный ряд: 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000, 6300, 8000, 10000, 12500, 16000, 20000, 28000 мм.

На примере токарно-карусельных станков был проведен вычислительный эксперимент по оптимизации значений типоразмерного ряда металлорежущих станков. Были проанализированы представленные на рынке РФ типоразмеры токарно-карусельных станков, диапазон главного параметра которых составляет от 400 мм до 28000 мм. На рынке РФ представлено 498 моделей токарно-карусельных станков отечественных и зарубежных производителей, потребность в них B_k - 908 шт. (за пять лет).

Представленным на рынке моделям соответствует 83 типоразмера. По результатам вычислений построены графики изменения значений оптимальности в зависимости от числа типоразмеров в ряду, выявлены области минимума (Рисунок 4).

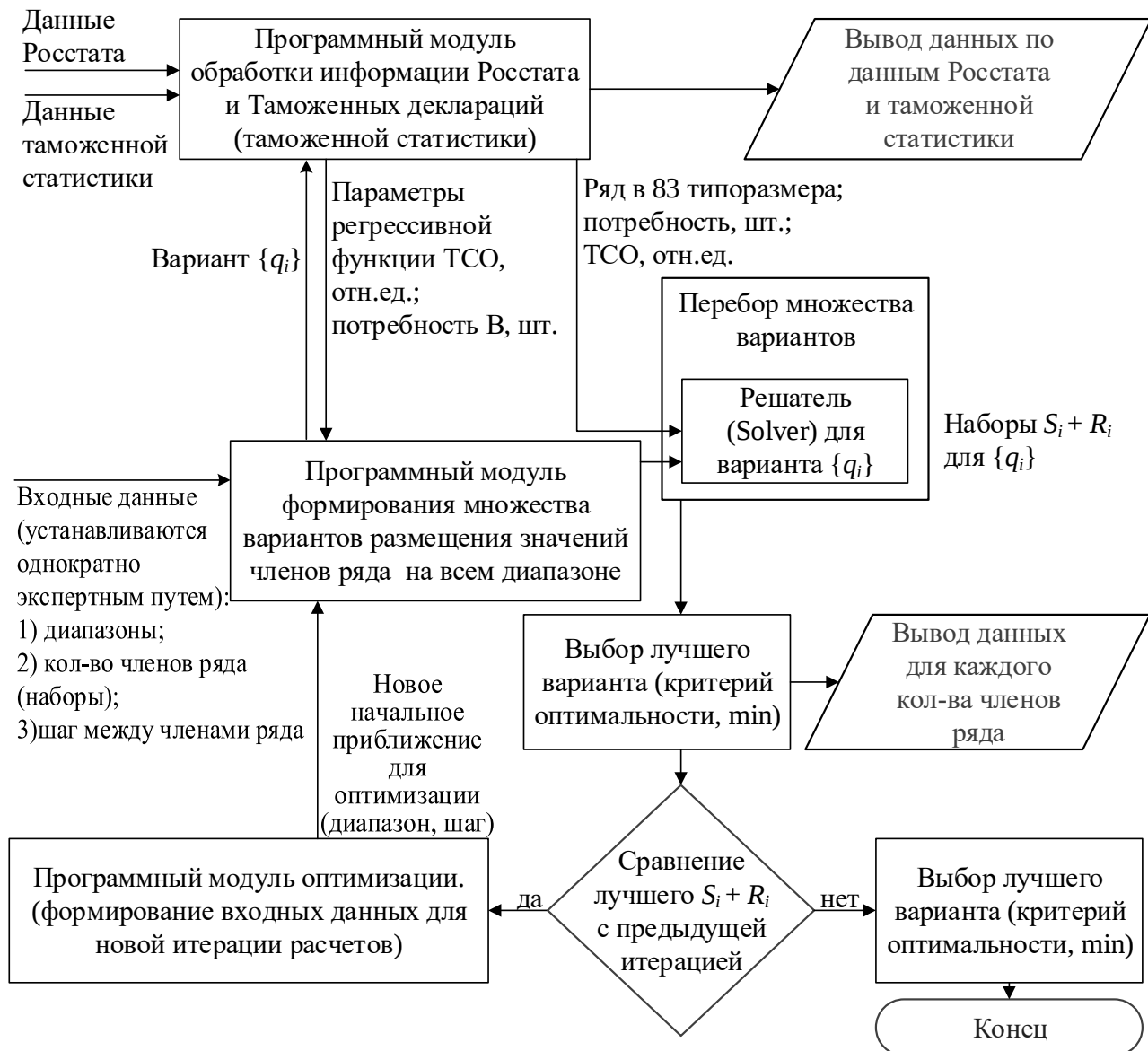


Рисунок 3. Схема работы разработанного программного комплекса

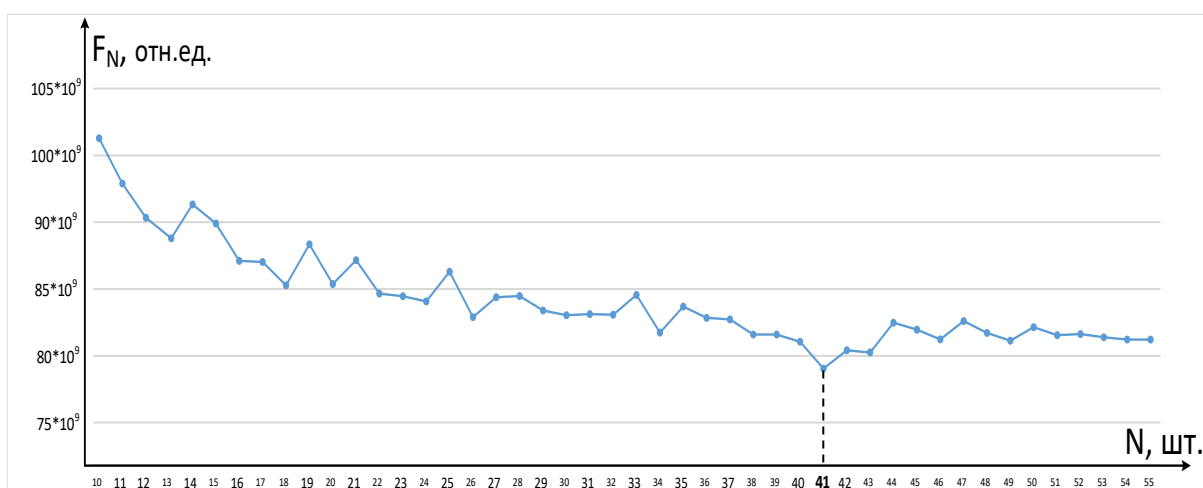


Рисунок 4. Зависимость значений оптимальности F_N от количества типоразмеров в ряду токарно-карусельных станков

В результате определен наиболее предпочтительный ряд типоразмеров токарно-карусельных станков, значения главных параметров ряда и распределение потребности (Таблица 1). На Рисунке 5 показаны графически

типоразмерный ряд токарно-карусельных станков в 83 типоразмера, представленных на рынке РФ, и оптимизированный типоразмерный ряд в 41 типоразмер, и распределение потребности для каждого из них.

Далее рассчитан экономический эффект от использования, оптимизированного типоразмерного ряда токарно-карусельных станков в сравнении с рядом, представленным на рынке РФ, который составил 6,1%.

Таблица 1.

Оптимизированный токарно-карусельный ряд металлорежущих станков

Кол-во в типоразмеров в ряду, N	Главный параметр типоразмерного ряда, мм (при оптимальном N)	Значение функционала F_N , отн.ед.
41	450, 490, 550, 610, 670, 750, 830, 920, 1020, 1130, 1250, 1390, 1540, 1710, 1900, 2100, 2330, 2590, 2870, 3180, 3530, 3910, 4340, 4810, 5340, 5920, 6570, 7280, 8080, 9000, 9940, 11000, 12200, 13500, 15000, 16700, 18500, 20500, 22800, 25200, 28000	79,5x10 ⁹
	Потребность, шт.	
	9, 8, 3, 5, 18, 3, 27, 17, 39, 10, 71, 13, 42, 51, 11, 43, 43, 84, 22, 64, 33, 38, 18, 37, 27, 21, 42, 22, 23, 7, 22, 5, 4, 12, 5, 3, 1, 1, 1, 2, 1	

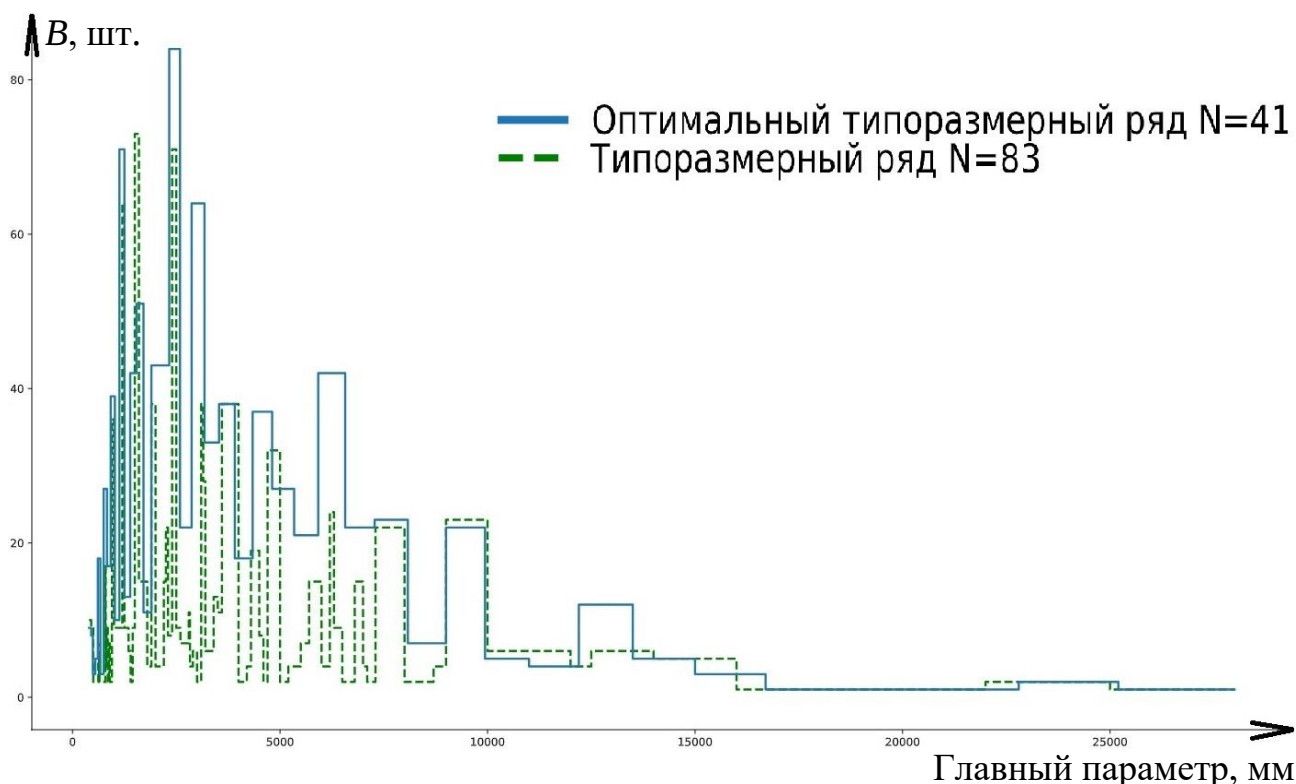


Рисунок 5. Типоразмерный ряд представленный на рынке РФ и оптимизированный ряд токарно-карусельных станков

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Выполнен анализ текущего состояния задачи построения типоразмерных рядов металлорежущих станков.

2. Установлены функциональные взаимосвязи между значениями технико-экономических показателей производства и оптимизируемых

параметрических рядов металлорежущих станков с учётом статистической информации о распределении требуемых значений.

3. Разработана адекватная реальным условиям математическая модель и построены критерии оптимизации типоразмерного ряда металлорежущих станков с использованием модифицированного метода расчета совокупной стоимости владения дополненный прогнозными характеристиками на пять лет и привязанный к структуре самого станка с использованием расширенного набора основных технико-экономических функций.

4. Разработан метод автоматизированного расчета параметров при проектировании металлорежущих станков на основе оптимизации типоразмерных рядов на основе адаптивных алгоритмов, позволяющий сократить материальные, трудовые затраты на производство и на эксплуатацию проектируемого оборудования, повышающий его конкурентоспособность.

5. Разработана вычислительная процедура и программная реализация идентификации типоразмерного ряда на основе адаптивных алгоритмов.

6. Проведен вычислительный эксперимент на примере токарно-карусельных станков по оптимизации значений типоразмерного ряда.

7. Выполнен сравнительный анализ типоразмерных рядов металлорежущих станков, вычислен экономический эффект, который составил 6,1 %.

8. В диссертационном исследовании содержится решение научной задачи автоматизации расчета параметров при проектировании металлорежущих станков на основе оптимизации типоразмерных рядов, как важного элемента производственной системы, направленной на повышение уровня проектирования металлорежущих станков с использованием современных методов информационных технологий.

9. Разработанные в диссертационном исследовании методы и полученные результаты будут полезны для научных и отраслевых специалистов, участвующих в разработке перспективных изделий станкостроительной продукции, а также для использования в учебном процессе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В РАБОТАХ

Из рекомендованного списка журналов в перечне ВАК РФ:

1. Система смазывания опор качения шпиндельных узлов станков с минимальным расходом смазочного материала / Н.С. Николаева (Лепина-Лавринович) [и др.] // Вестник машиностроения. 2007. № 6. С. 3–11.

2. Николаева Н.С., Плетнев В.А., Ягопольский А.Г. Особенности проектирования металлорежущего оборудования для повышения его конкурентоспособности // Инновации и инвестиции. 2017. №3. С. 126–130.

3. Николаева Н.С., Мещерякова В.Б. Современные подходы к проектированию и модернизации станков с ЧПУ при внедрении высокоскоростной обработки // Технология машиностроения. 2018. №3. С. 18–25.

4. Николаева Н.С., Антипенко В.С., Утенков В.М. Оптимизация размерных рядов металлорежущих станков для производства спецтехники // Грузовик. 2018. №9. С. 16–20.

5. Николаева Н.С., Антипенко В.С., Харитонов Ю.Н. Оптимизация размерных рядов металлорежущего оборудования для повышения качества продукции // Качество и жизнь. 2018. №4(20). С. 426–428.

6. Николаева Н.С., Антипенко В.С., Соломенцев Ю.М. Повышение эффективности серийного производства деталей путём управления процессами формирования размерного ряда металлообрабатывающих станков // Автомобильная промышленность. 2019. №7. С. 32–35.

7. Николаева Н.С., Мещерякова В.Б., Фенютина В.А. Инновационные методы проектирования узлов станков для высокоскоростной обработки автомобильных деталей // Грузовик. 2020. № 1. С. 28–32.

8. Николаева Н.С., Антипенко В.С., Харитонов Ю.Н. Маркетинговое исследование структуры совокупной стоимости владения для оптимизации выбора станков // Качество и жизнь. 2020. №1(25). С. 82–86.

9. Систематизация математических моделей на рынке складских услуг на транспорте / Н.С. Николаева и [др.] // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. 2022. №8. С. 58–63.

10. Николаева Н.С., Антипенко В.С., Касименко Л.М. Обзор концепций управления запасами от простейших технико-экономических моделей до методов интегрального управления запасами // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. 2022. № 7. С. 27–32.

11. Николаева Н.С., Антипенко В.С., Бабич Н.С. Нарастивание темпов производства деталей на предприятиях машиностроительной отрасли // Тенденции развития науки и образования. 2022. № 82–1. С. 156 – 160.

12. Николаева Н.С., Антипенко В.С., Мещерякова В.Б. Особенности применения гибких производственных модулей для повышения точности обработки деталей автомобилей // Грузовик. 2024. № 10. С. 18–21.

13. Николаева Н.С., Антипенко В.С., Мещерякова В.Б. Влияние настройки столов-спутников ГПМ на повышение качества обработки деталей // Грузовик. 2024. № 11. С. 30–34.

Статьи, индексируемые в Scopus:

14. Nikolaeva N.S., Antipenko V.S. Function for Optimization Parameters of Power Engineering Objects // Proceedings of the 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2024. 2024. 270 №325. P.1-5.

15. Nikolaeva N.S., Antipenko V.S. Algorithms for optimizing the values of parametric series of machine tools // Proceedings of the 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2024. 2024. 270 №327. P.1-5.

16. Nikolaeva N.S., Antipenko V.S. Automatic generation of optimal standard-size series of engineering products using modified method for calculating total cost of ownership // Proceedings of the 2025 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE. 2025. 230 №357. P.1-5.

Статьи в других периодических изданиях, сборниках научных трудов, трудах научных конференций:

17. Проектирование компоновки оборудования для судостроительной промышленности на основе метода двухуровневой оптимизации конструкции / Н.С. Лепина-Лавринович (Николаева) [и др.] // Материалы V молодежной научно-технической конференции «Взгляд в будущее». (25–26 октября 2007). СПб.: ФГУП «ЦКБ МТ «Рубин», 2007. С. 191–195.

18. Лепина-Лавринович (Николаева) Н.С., Николаев А.А. Проектирование компоновки оборудования для машиностроительных предприятий на основе метода двухуровневой оптимизации конструкции // Сборник трудов Четвертой международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». 11 том. (02–05 ноября 2007). СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. С. 284–285.

19. Николаева Н.С. Построение размерных рядов металлорежущих станков для производства и ремонта железнодорожного транспорта // Труды XIX Всероссийской научно-практической конференции «Безопасность движения поездов». (8-9 ноября 2018). М.: МИИТ, 2018. С. IV-38 – IV-39.

20. Николаева Н.С. Влияние оптимизации размерных рядов оборудования на экологическую систему // Проблемы безопасности Российского общества. 2018. № 4 (24). С. 36–38.

21. Николаева Н.С., Николаев А.А. Расчет совокупной стоимости владения (ТСО) металлообрабатывающим оборудованием и применение ТСО при выборе закупаемого оборудования // Научные материалы Международной молодежной научно-технической конференции «Аэрокосмические технологии», посвященный 105-летию со дня рождения академика В.Н. Челомея. (Реутов, 28 мая 2019). М.: АО «ВПК «НПО машиностроения», МГТУ им. Баумана, 2019. С. 122–123.

22. Николаева Н.С., Николаев А.А. Расчет совокупной стоимости владения (ТСО) металлообрабатывающим оборудованием и применение ТСО при выборе закупаемого оборудования // Аэрокосмические технологии: Научные материалы Международной молодежной научно-технической конференции, посвященной 105-летию со дня рождения академика В.Н. Челомея (Реутов, 28 мая 2019) / под ред. Р.П. Симоньянца. М.: Совместное издание АО «ВПК «НПО машиностроения» и МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. С. 180–181.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

23. Николаева Н.С. Программный комплекс «Формирование оптимальных типоразмерных рядов металлорежущих станков» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. №2025610954 от 16.01.2025.