

## *Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, системы автоматизации проектирования*

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.9.06

doi: 10.30987/2658-6436-2025-4-4-10

### **ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫБОРА КОМПОНОВОК АГРЕГАТНЫХ СТАНКОВ ПО ПАРАМЕТРАМ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ЗАГОТОВКИ НА СТАДИИ ЭСКИЗНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

**Александр Сергеевич Далечин<sup>1✉</sup>, Александр Николаевич Феофанов<sup>2</sup>**

<sup>1, 2</sup> Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва, Россия

<sup>1</sup> dalechin.as.99@gmail.com

<sup>2</sup> feofanov.fan1@yandex.ru

**Аннотация.** Рассмотрен вопрос формализации процесса выбора компоновок агрегатных станков на стадии эскизного проектирования. Проанализированы существующие подходы к созданию компоновок агрегатных станков в автоматизированном режиме. В виде ментальных карт, в статье присутствует описание параметров детали и её технологического процесса изготовления, которые влияют на компоновку агрегатного станка. Рассмотрена процедура установления связей между параметрами и характеристиками детали и размерами узлов агрегатного станка. Приведено математическое описание процесса выбора компоновок агрегатных станков по параметрам обрабатываемой заготовки с помощью элементов теории множеств и комбинаторики. Целью является разработка автоматизированной системы выбора визуализированных компоновок агрегатных станков на стадии эскизного проектирования и технического предложения. Методы исследования: морфологический анализ, синтез, наблюдение. Статья включает в себя разработки и схемы, которые помогут создать программную реализацию для дальнейшей подготовки автоматизированной системы. В результате разработаны ментальные карты связей между параметрами обрабатываемой детали и размерами унифицированных узлов агрегатного станка. Представлено математическое описание процесса выбора компоновок агрегатных станков в автоматизированном режиме. Выводы: данная статья является одним из этапов разработки автоматизированной системы выбора компоновок агрегатных станков.

**Ключевые слова:** теория множеств, автоматизированная система, агрегатный станок, автоматизация, ментальная карта

**Для цитирования:** Далечин А.С., Феофанов А.Н. Формализация процесса выбора компоновок агрегатных станков по параметрам обрабатываемой заготовки на стадии эскизного проектирования // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2025. №4 (30). С. 4-10. doi: 10.30987/2658-6436-2025-4-4-10.

Original article

Open Access Article

### **FORMALIZING THE PROCESS OF SELECTING AGGREGATE MACHINE LAYOUTS BASED ON PARAMETERS OF THE MACHINED BLANK AT THE SKETCH DESIGN STAGE**

**Alexander S. Daletchin<sup>1✉</sup>, Alexander N. Feofanov<sup>2</sup>**

<sup>1, 2</sup> Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia

<sup>1</sup> dalechin.as.99@gmail.com

<sup>2</sup> feofanov.fan1@yandex.ru

**Abstract.** The article addresses formalizing the process of selecting aggregate machine configurations at the conceptual design stage; analyses existing approaches to automating the creation of aggregate machine layouts. The authors use mental maps to describe the parameters of the workpiece and its manufacturing process, which influence the

*aggregate machine layout. The paper describes the procedure for establishing relationships between workpiece parameters and dimensions of standard aggregate machine units; provides a mathematical description of the process of selecting aggregate machine layouts based on workpiece parameters using elements of set theory and combinatorics. The aim is to develop an automated system for selecting visualized aggregate machine layouts at the conceptual design and technical proposal stages. Research methods include morphological analysis, synthesis, and observation. The article contains designs and schematics to facilitate the software implementation for the further preparation of the automated system. As a result, the authors have depicted mental maps depicting the relationships between workpiece parameters and standardized unit dimensions of aggregate machines, present a mathematical description of the automatic selection process for aggregate machine layouts. The findings state that this article represents one step in developing an automated system for selecting aggregate machine layouts.*

**Keywords:** set theory, automated system, aggregate machine, automation, mental map

**For citation:** Daletchin A.S., Feofanov A.N. Formalizing the Process of Selecting Aggregate Machine Layouts Based on Parameters of the Machined Blank at the Sketch Design Stage. Automation and modeling in design and management, 2025, no. 4 (30). pp. 4-10. doi: 10.30987/2658-6436-2025-4-4-10.

## Введение

Для повышения конкурентоспособности отечественной продукции машиностроения перед организациями-производителями металлорежущего станочного оборудования стоит важная задача по увеличению производительности, модернизации структуры и расширению номенклатуры изготавливаемых станков. Данное обстоятельство в равной степени актуально и для технологического оборудования для крупносерийного и массового производства, такого как агрегатные станки (АС). Существенным преимуществом данного вида станков является их высокая производительность по сравнению с универсальным оборудованием, постоянство качества выпускаемых деталей, возможность использования меньшего количества персонала более низкой квалификации и сравнительно невысокая стоимость станков. В частности, этот вид оборудования находит активное применение как на предприятиях Союзного государства (МТЗ, МАЗ, БЕЛАЗ, КАМАЗ и др.), так и в мире в целом (предприятия автомобильного сектора промышленности, производство трубопроводной арматуры и пр.).

За счет реализации модульного принципа проектирования технологического оборудования, примененного в рассматриваемых станках [1], при их конструировании возможен подход к созданию компоновок по параметрам обрабатываемых деталей. Элементы данного подхода рассматривались такими авторами как: Перегудов Л.В., Врагов Ю.Д., Аверьянов, Лехмус М.Ю. и др. Согласно базовой, для теории компонетики металлорежущих станков (МС), работе Врагова Ю.Д. [2] – компоновка станка является самостоятельным объектом изучения и отражает свои свойства на все ключевые технико-экономические характеристики проектируемого оборудования. В свою очередь, качество компоновки МС определяется решениями, принятыми на этапе технического предложения и эскизного проектирования. Формализацию описания компоновок металлорежущих станков на основе семизначного кода для отражения пространственного положения и типов элементов компоновки предложил в своей работе Лехмус М.Ю. [3]. Помимо этого, автор рассмотрел систему формализации описания требований отбора, систему структурного синтеза и систему пространственного синтеза компоновок металлорежущих станков. Данный научный задел может быть применен при структуризации компоновок АС и создании системы визуализации компоновок АС.

В другой диссертации [4] Перегудов Л.В. рассматривает вопрос теоретических основ формирования множества множеств структур АС и формализованные модели их взаимосвязей со структурой технологического процесса, производительностью, надежностью и параметров формы обрабатываемых поверхностей деталей, что позволяет осуществлять выбор наиболее рационального варианта компоновки АС при минимуме затрат.

Диссертация Гельштейна Я.М. [5] посвящена разработке методологического обеспечения процесса автоматизированного проектирования компоновок АС посредством разработки критериев поиска и анализа рациональных компоновок. Одной из решенных задач исследования стало разработанное программное обеспечение проектирования и выбора наиболее подходящего варианта компоновки АС. В более современном исследовании [6] автор рассматривает применение модульного подхода при проектировании станков с ЧПУ для единичного мелкосерийного производства. В рамках работы разработана методика унификации основных модулей станочного оборудования с ЧПУ, основанная на выделении ключевого агрегата и параметризации технологических модулей, обеспечивающую их аппаратную совместимость. В

работе [7] предложена математическая модель модульного проектирования станков с ЧПУ на основе спроса потребителей, основанная на анализе требований клиентов. С помощью рассматриваемой функции качества выявляется базовая структура станков, путем дальнейшего применения нечеткой кластеризации и построения диаграммы динамической кластеризации выполняется уточнение структуры станка.

Тем не менее, в работе предлагается применение и расширение рассмотренных выше подходов в части автоматизированного выбора визуализированных компоновок АС по параметрам обрабатываемой детали.

### Материалы, модели, эксперименты и методы

Для полного понимания связей характеристик детали и технологического процесса (ТП) её изготовления с компоновкой АС, на рис. 1 представлена диаграмма связей, известная также как интеллект-карта или ментальная карта [8].



Рис. 1. Диаграмма связей между параметрами обрабатываемой детали и компоновкой АС  
 Fig. 1. Diagram of relationships between workpiece parameters and the configuration of a transfer machine

На рассматриваемой диаграмме представлены следующие ключевые параметры, определяющие компоновку АС:

- 1) объем выпуска деталей ( $Q$ , шт/год);
- 2) ориентация поверхностей заготовки в рабочей зоне станка;
- 3) режимы резания, усилие резания ( $F$ ,  $H$ );
- 4) габаритные размеры детали: длина ( $L$ , мм), ширина ( $B$ , мм), высота ( $H$ , мм);
- 5) масса заготовки ( $M$ , кг);
- 6) получаемая шероховатость, требуемая по чертежу ( $Ra$ , мкм);
- 7) получаемые показатели качества, требуемые по чертежу ( $IT$ ).

Прежде всего, вид компоновки зависит от требуемых объемов выпуска станка, т.к. для средне- и крупносерийного производства существуют разные подходы к написанию технологических процессов изготовления изделий, проектированию схем наладки инструмента и самого технологического оборудования. Так как в крупносерийном и массовом производстве преимущественно обрабатываются детали несложной геометрической формы, то в рабочей зоне станка деталь размещается исходя из ориентации обрабатываемой поверхности относительно плоскости поворотного делительного стола АС (параллельно плоскости стола, перпендикулярно плоскости стола, под углом к плоскости стола). Режимы резания в АС определяют узлы, отвечающие за основное главное движение резания и за движение подачи – узлы резания (сверлильные, фрезерные, расточные бабки и т.д.) и силовые столы. Так как при невозможности выполнить требование ТП при обработке узлом АС выбранного габарита, выбирается следующий по габариту узел. Габаритные размеры детали определяют все основные узлы АС, т.к. при выборе агрегатов и базовых элементов станка проводится проверка на возможность размещения заготовки детали на базовых узлах АС (средняя станина, поворотный делительный стол) и возможность её обработки узлами резания. Масса заготовки учитывается при подборе средней станины и поворотного делительного стола для проверки условия по допустимой грузоподъемности указанных узлов. Требования к качеству и точности поверхностей не являются определяющими в случае АС. Так как узлы АС изготавливаются классами точности «Н» и

«П», что не позволяет обрабатывать на готовых станках особо точные детали. Однако не все указанные параметры будут рассматриваться далее в автоматизированной системе выбора компоновок АС. Такая характеристика как объем выпуска учитывается конструктором при выборе компоновки и перечная узлов, предлагаемых системой, поэтому компоновка по параметру «объем выпуска» самой системой не определяется. Требования к качеству и точности поверхностей в системе не используются по причине ограничений точности узлов АС, описанной выше.

Для описания процедуры выявления связей между параметрами детали и характеристиками узлов АС при выборе компоновок, подготовлена ментальная карта, изображенная на рис. 2.

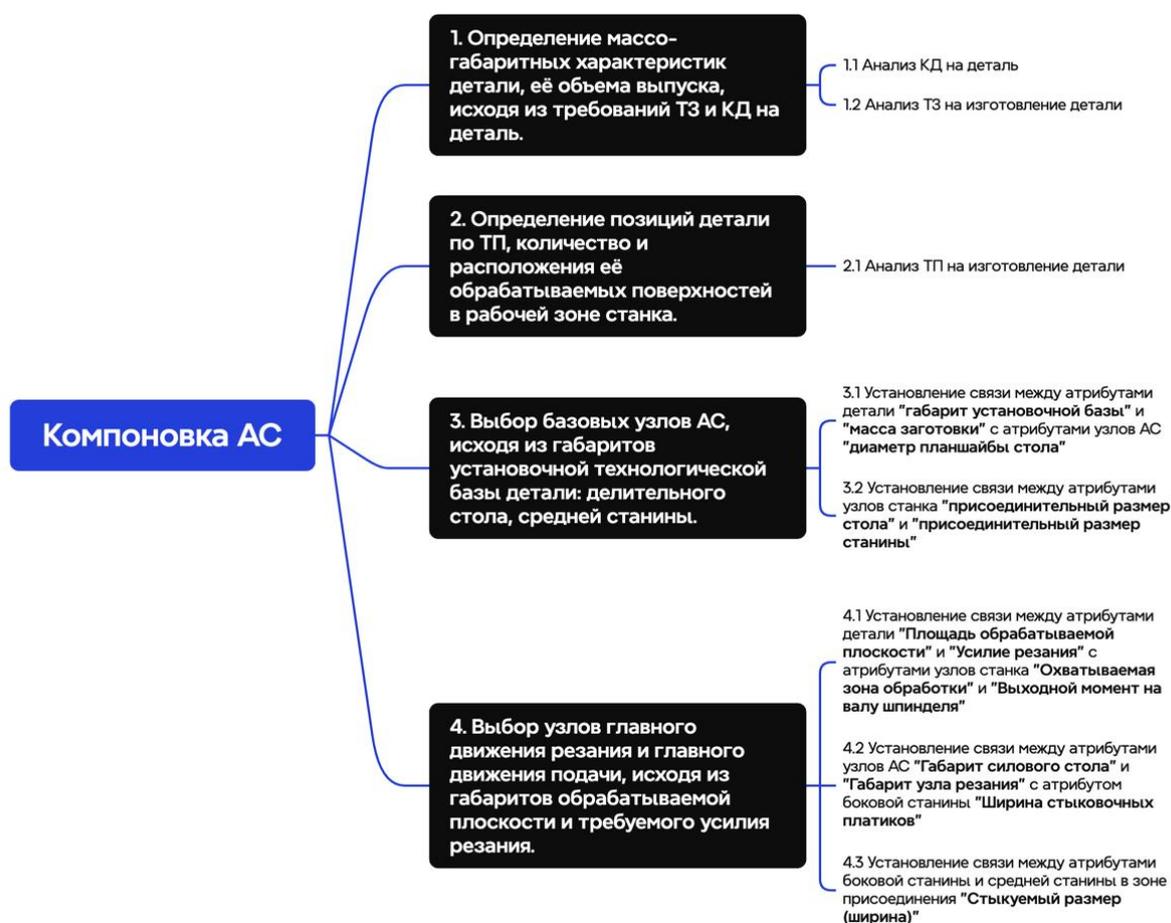


Рис. 2. Ментальная карта процедуры выявления связей между параметрами детали и характеристиками узлов АС

Fig. 2. Mind map of the procedure for identifying relationships between workpiece parameters and transfer machine unit characteristics

Согласно представленной карте, в начале осуществляется установление массогабаритных характеристик деталей, объема выпуска, исходя из требований технического задания (ТЗ) и конструкторской документации (КД). Далее выполняется анализ технологического процесса изготовления детали, определяются обрабатываемые поверхности, их количество и расположение в рабочей зоне станка. Затем определяются базовые центральные узлы – поворотный делительный стол и средняя станина. Происходит установление связей и наложение зависимостей между размером установочной технологической базой детали, её массой и размером планшайбы поворотного делительного стола. Между присоединительным стыковочным размером стола и средней станины устанавливаются связи и накладываются зависимости. На последнем этапе осуществляется выбор узлов резания, узлов подачи и станин под данные узлы. Выполняется установление связей и наложение зависимостей между габаритами обрабатываемой плоскости, усилием резания и габаритом узла резания. Накладываются зависимости на присоединительные размеры узла резания и узла подачи, узла подачи и боковой станины.

## Результаты

Ранее в [9] было выдвинуто описание множества конструкций АС в виде И-ИЛИ-дерева. В указанной работе проводилось группирование унифицированных узлов АС, исходя из их взаимозаменяемости между собой. Далее предлагается к рассмотрению множество возможных компоновок АС, подготовленное с помощью методов морфологического анализа и синтеза, рис. 3.

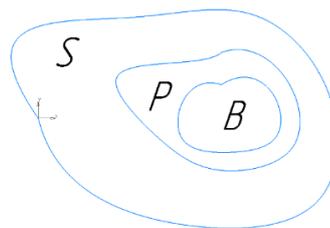


Рис. 3. Множества возможных компоновок АС  
Fig. 3. Sets of possible transfer machine configurations

Пусть  $S$  – непустое множество всех возможных вариантов компоновок АС, сконструированных из унифицированных узлов [10].

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}, \quad (1)$$

где  $k$  – число таких компоновок.

Подмножество  $P$  – множество эквивалентных компоновок АС, являющихся решением технологической задачи.

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}, \quad (2)$$

где  $n$  – количество всех эквивалентных компоновок, удовлетворяющих решению поставленной технологической задачи.

Множество  $P$  включает в себя компоновки, позволяющие обработать деталь с учетом её габаритных размеров, массы, ориентации обрабатываемых поверхностей.

Подмножество  $B$  – конечное множество вариантов решения проектной задачи, утвержденные варианты компоновок.

$$B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}, \quad (3)$$

где  $m$  – количество всех выбранных компоновок, удовлетворяющих решению поставленной проектной задачи.

$B$  является множеством компоновок, утвержденных ответственным конструктором, с учетом требований ТЗ по объему выпуска  $Q$ , размещения станка в цеху, соблюдения условий занимаемой площади оборудования и т.д.

Таким образом, согласно [11] справедливо следующее:

$$B \subset P \subset S.$$

Соответственно, каждый элемент множества  $B$  должен удовлетворять обозначенным выше условиям, рис. 4.

Как следствие, для множества возможных компоновок  $S$  справедливы общие правила комбинаторики. Для конкретного АС число компоновок будет рассчитываться по следующей формуле:

$$S_k = s'_{k1} \cdot s'_{k2} \cdot \dots \cdot s'_{kp}, \quad (4)$$

где  $s'_i$  – количество узлов одного типа,  $p$  – число используемых в компоновке узлов АС.

Приведем в пример расчет количества вариантов компоновок одностороннего АС со средней станиной и поворотным делительным столом вертикальной или горизонтальной компоновки, который может выполнять или сверлильные, или фрезерные, или расточные операции, или же использовать многошпиндельную коробку. Для расчета будут использованы данные БД [12].

$$S_1 = s'_{11} \cdot s'_{12} \cdot s'_{13} \cdot s'_{14} \cdot s'_{15} = 1 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 4 = 128, \quad (5)$$

где  $s'_{11}$  – число видов поворотных делительных столов,  $s'_{12}$  – число видов средних станин,  $s'_{13}$  – число видов боковых станин или подставок,  $s'_{14}$  – число видов силовых столов,  $s'_{15}$  – число видов узлов резания.

В свою очередь, для выбора эквивалентных компоновок, являющихся решением технологической задачи, обратимся к производственной функции Кобба-Дугласа [13]:

$$Q = f(K, L),$$

где  $K$  – суммарное количество основных средств (станков),  $L$  – суммарное количество труда.

При внедрении АС в условиях крупносерийного или массового производства суммарный объем основных средств ( $K$ ) как правило увеличивается за счёт приобретения унифицированных узлов и систем автоматизации, а потребность в труде ( $L$ ) снижается благодаря уменьшению количества ручных операций. При оптимальной компоновке АС это приводит к росту производительности ( $Q$ ).

Следовательно, вид компоновки технологического оборудования оказывает влияние на доступные производственные мощности. При более высоких объемах (в массовом и крупносерийном производстве) выпусках применяют принцип дифференциации технологических переходов, в среднесерийном производстве для повышения универсальности технологических модулей применяют принцип концентрации переходов.

Соответственно, для количества узлов резания АС имеет место следующее утверждение:

$$N = \frac{Q'}{k}, \quad (6)$$

где  $Q'$  – требуемый объем выпуска,  $N$  – количество унифицированных узлов резания,  $k$  – количество одновременно выполняемых технологических переходов одним узлом резания,  $k = 1$  – крупносерийное и массовое производство,  $k > 1$  – среднесерийное производство.

То есть при формировании компоновки АС фактор планируемого объема выпуска играет важную роль. Компоновки станков, обеспечивающие фактическую обработку детали, могут не соответствовать требуемой производительности или же обеспечивать объемы выпуска, но занимать чрезмерно большую производственную площадь.

### Заключение

Предложенный подход к выбору визуализированных компоновок агрегатных станков является основой для последующей разработки автоматизированной системы, позволяющей сократить трудоемкость проектирования АС на стадиях эскизного проектирования и технического предложения.

Рассмотренное математическое описание выбора создания компоновок АС формализует процесс выбора и утверждения компоновки АС с помощью элементов теории множеств и комбинаторики.

С помощью приведенных выше утверждений, возможна дальнейшая программная реализация рассмотренных подходов в рамках автоматизированной системы подготовки визуализированных компоновок АС по параметрам обрабатываемой заготовки.

### Список источников:

1. Аверьянов О.И. Модульный принцип построения станков с ЧПУ. – М.: Машиностроение, Москва. – 1987. – 232 с.
2. Врагов Ю.Д. Анализ компоновок металлорежущих станков: (Основы компонетики). – Москва: Машиностроение, 1978. – 208 с.
3. Лехмус М.Ю. Автоматизированный синтез компоновок металлорежущих станков: диссертация ... кандидата технических наук: 05.03.01. – Москва, 1992. – 120 с.

### References:

1. Averyanov O.I. Modular Principle of CNC Machine Construction. Moscow: Mashinostroenie; 1987.
2. Vragov Y.D. Analysis of Metal-Cutting Machine Layouts: Basics of Component Arrangement. Moscow: Mashinostroenie; 1978.
3. Lehmus M.Yu. Automated Synthesis of Metal-working Machine Layouts. Dissertation for the Candidate of Engineering Degree. Moscow; 1992.

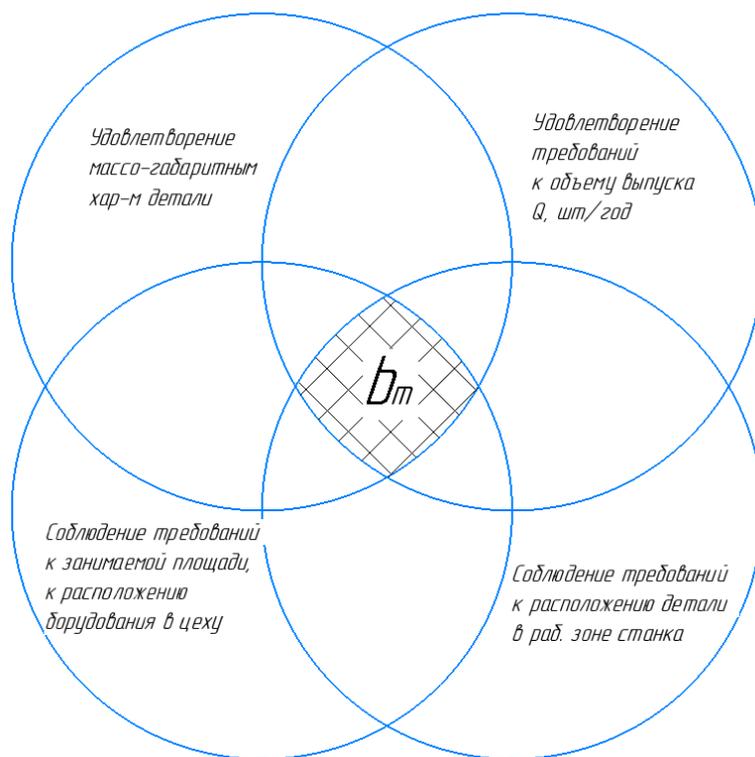


Рис. 4. Элемент множества  $B$   
Fig. 4. Element of set  $B$

4. Перегудов Л.В. Основы теории синтеза структурных компоновок агрегатных станков: диссертация ... доктора технических наук: 05.03.01. – Ташкент, 1989. – 409 с. + Прил. с. 410-525.
5. Гельштейн Я.М. Повышение эффективности проектирования компоновок агрегатированных многооперационных станков: диссертация ... кандидата технических наук: 05.03.01. – Москва, 1984. – 368 с.
6. Крылова А.А. Исследование и разработка модульного технологического оборудования для единичного и мелкосерийного производства: диссертация ... кандидата технических наук: 05.11.14 / Крылова Анастасия Андреевна; [Место защиты: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО»]. – Санкт-Петербург, 2021. – 309 с.
7. Li F., Li X., Xie H. Modular design research of computer numerical control machine tools oriented to customer requirements // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2020. – Т. 12. – № 4.
8. Ревенков А.В., Резникова Е.В. Теория и практика решения технических задач: учеб. Пособие / А.В. Ревенков, Е.В. Резникова. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ФОРУМ, 2009. – 384 с.
9. Далечин А.С., Фефанов А.Н. Роль автоматизированной системы выбора компоновок агрегатных станков на стадии эскизного проектирования // *Вестник МГТУ «Станкин»*. – 2025. – № 2 (73). – С. 126-133.
10. Брон Л.С., Зайцева А.М., Токарева С.В. Унифицированные узлы агрегатных станков и автоматических линий. – Москва: НИИмаш, 1983 – 136 с.
11. Аверченков В.И. Основы математического моделирования технических систем: учеб. пособие / В.И. Аверченков, В.П. Федоров, М.Л. Хейфец; М-во образования и науки Рос. Федерации, Брян. гос. техн. ун-т. – Брянск: Изд-во БГТУ, 2004. – 269.
12. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025620903 Российская Федерация. База данных визуализированных унифицированных узлов агрегатных станков: заявл. 13.02.2025; опубл. 25.02.2025 / А.С. Далечин, А.Н. Фефанов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
13. Клейнер Г.Б. Производственные функции: Теория, методы, применение. – Москва: Финансы и статистика, 1986. – 238с.
4. Peregudov L.V. Foundations of the Synthesis Theory for Structural Layouts of the Aggregated Machine. Dissertation for the Doctor of Engineering Degree. Tashkent; 1989.
5. Gelstein Y.M. Improving the Efficiency of Designing Assembly Multi-Operation Machine Layouts. Dissertation for the Candidate of Engineering Degree. Moscow; 1984.
6. Krylova A.A. Research and Development of Modular Technological Equipment for Single-Piece and Small-Batch Production. Dissertation for the Candidate of Engineering Degree. Saint Petersburg; 2021.
7. Li F., Li X., Xie H. Modular Design Research of Computer Numerical Control Machine Tools Oriented to Customer Requirements. *Advances in Mechanical Engineering*. 2020;12(4):168781402091657.
8. Revnenkov A.V., Reznikova E.V. Theory and Practice of Solving Technical Problems. 2nd ed. Moscow: Forum; 2009.
9. Dalechin A.S., Feofanov A.N. The Role of an Automated System for Choosing the Layouts of Transfer Machines at the Draft Design Stage. *Vestnik MSUT Stankin*. 2025;2(73):126-133.
10. Bron L.S., Zaitseva A.M., Tokareva S.V. Standard Units of Aggregated Machines and Automatic Lines. Moscow: NIImash; 1983.
11. Averchenkov V.I. Fedorov V.P., Kheyfets M.L. Fundamentals of Mathematical Modelling of Technical Systems. Bryansk: Bryansk State Technical University; 2004.
12. Dalechin A.S., Feofanov A.N. Visualized Standard Units Database for Aggregated Machines. Certificate of State Registration of Database RF, no. 2025620903. Moscow State University of Technology “STANKIN”; 2025 Feb 25.
13. Kleiner G.B. The Production Functions: Theory, Methods and Application. Moscow: Finansy i Statistika; 1986.

#### **Информация об авторах:**

**Далечин Александр Сергеевич**  
аспирант Московского государственного технологического университета «СТАНКИН».

**Фефанов Александр Николаевич**  
доктор технических наук, профессор кафедры инженерная графика Московского государственного технологического университета «СТАНКИН», вице-президент академии проблем качества, отделение «Квалиметрия» Московского государственного технологического университета «СТАНКИН».

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья поступила в редакцию 21.08.2025; одобрена после рецензирования 19.09.2025; принята к публикации 12.10.2025.**

**The article was submitted 21.08.2025; approved after reviewing 19.09.2025; accepted for publication 12.10.2025.**

**Рецензент** – Медведев Д.М., кандидат технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

**Reviewer** – Medvedev D.M., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.

#### **Information about the authors:**

**Dalechin Alexander Sergeevich**  
Postgraduate Student of Moscow State University of Technology «STANKIN».

**Feofanov Alexander Nikolayevich**  
Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Engineering Graphics of Moscow State University of Technology «STANKIN», Vice President of the Academy of Quality Problems, of Qualimetry Division of Moscow State University of Technology «STANKIN»