

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. №7 (181). С. 10-18.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. №7 (181). P. 10-18.

Научная статья

УДК 621.9

doi: 10.30987/2223-4608-2026-7-10-18

Принципы интеграции компонентов технологической подготовки механообработки и сборки высокоточных изделий

Петр Юрьевич Бочкарев¹, д.т.н.

Александр Викторович Назарьев², к.т.н.

¹ Камышинский технологический институт, филиал Волгоградского государственного
технического университета, Камышин, Россия

² Филиал НРЦ автоматики и приборостроения имени академика Н.А. Пилюгина, Саратов, Россия

¹ bpy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0587-6338>

² alex121989@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0610-6060>

Аннотация. В представленной работе исследуются актуальные аспекты совершенствования технологической подготовки производства в условиях многономенклатурного механообрабатывающего производства. Основное внимание уделяется разработке методологии, обеспечивающей интеграцию процессов механической обработки и сборки посредством установления эффективных взаимосвязей между различными стадиями производственного цикла. Ключевая цель исследования заключается в создании комплексной системы проектных процедур, позволяющей учитывать требования к сборке на этапе проектирования технологических процессов механической обработки. Формируются варианты обобщенных графов, включающие в себя графы конструкторского размерного анализа сборочных единиц и деталей, а также варианты графов технологического размерного анализа каждой детали, задействованной в сборке. Графы технологического размерного анализа вариантов являются элементами объединенного графа сопряжений и размеров. Такой подход способствует рациональному использованию производственных мощностей и оптимизации технологических возможностей оборудования. В ходе исследования был разработан и апробирован комплекс формализованных проектных процедур технологической подготовки механообработки и сборки высокоточных изделий. Экспериментальные исследования подтвердили эффективность предложенной методологии. Анализ полученных результатов демонстрирует значительное улучшение производственных показателей: сокращение времени сборочных операций за счет минимизации количества итераций, снижение объема незавершенного производства на 15,5 %, а также повышение качества конечной продукции. Практическая значимость работы заключается в возможности внедрения разработанной системы в действующие многономенклатурные производственные комплексы и созданию системы автоматизированного проектирования. Предложенные решения способствуют углублению процессов цифровой трансформации при проектировании и технологической подготовке производства. Это создает предпосылки для формирования системного подхода к оценке производственной технологичности высокоточных изделий и автоматизации процессов проектирования технологических процессов производства и сборки. Перспективные направления дальнейших исследований связаны с расширением функционала разработанной системы и её адаптацией к различным типам производственных процессов.

Ключевые слова: высокоточное изделие, сборочное производство, комплекс проектных процедур, граф размеров, граф сопряжений элементов сборочной единицы, граф технологического размерного анализа, генетический алгоритм, обобщенный граф поверхностей

Для цитирования: Бочкарев П.Ю., Назарьев А.В. Принципы интеграции компонентов технологической подготовки механообработки и сборки высокоточных изделий // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 7 (181). С. 10–18. doi: 10.30987/2223-4608-2026-7-10-18

Staging components integration principle of machining process and exacting products assembly

Peter Yu. Bochkarev¹, D. Eng.

Alexander V. Nazariev², Ph.D Eng.

¹ Kamyshtinsky Institute of Technology, branch of Volgograd State Technical University, Russia

² Branch of the Scientific and Production Center of Automation and Instrument Engineering named
after academician N. A. Pilyugin (NPTSAP).

¹ bpy@mail.ru

² alex121989@mail.ru

Abstract. In the work presented here a few current aspects of improving the process design in high-variety machining facilities are investigated. The paper is focused on developing an experimental technique that ensures the integration of machining and assembly processes through intercommunication of various stages in the production cycle. The key research idea is to create an integrated system of design procedures that allows taking into account assembly requirements at the design stage of machining processes. Variants of generalized graphs are formed, including graphs of design dimensional analysis for assembly units and parts, as well as variants of graphs of in-process test and dimensional analysis of each part involved in the assembly. Graphs of technological dimensional analysis of variants are the elements of a combined graph of integration and dimensions. This approach contributes to the rational use of production facilities and optimization of machine's capabilities. In the course of the research, a formalized design procedure package for machining process and exacting products assembly was developed and tested. Experimental studies have proved the effectiveness of the proposed strategy. The analysis of the results gives a significant improvement in operating performance: reducing the time of assembly operations by minimizing the number of iterations, reducing the volume of work-in-progress by 15,5 %, as well as improving the quality of the final product. The practical importance of the work lies in the possibility of implementing the developed system into existing high-variety machining facilities and creating an automated design system. The proposed solutions contribute to the deepening of digital transformation processes in the design and process design. This creates opportunities for the formation of a systematic approach to assessing the manufacturability of high-precision products and automating the design of manufacturing and assembly operations. Promising areas of further research are related to the expansion of the functionality of the developed system and its adaptation to various types of manufacturing activity.

Keywords: exacting product, assembly production, design procedures package, graph of dimensions, graph of an assembly unit elements integration, graph of technological dimensional analysis, genetic algorithm, generalized graph of surfaces

For citation: Bochkarev P.Yu., Nazariev A.V. Staging components integration principle of machining process and exacting products assembly / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. № 7 (181). P. 10–18. doi: 10.30987/2223-4608-2026-7-10-18

Введение

Финальная стадия производства, сборка изделий, является ключевой и наиболее ответственной частью технологического процесса изготовления. Это особенно актуально для высокоточных изделий, которые широко используются в военно-промышленном комплексе, ракетно-космической и авиационной отраслях, а также в подшипниковой промышленности, прецизионном станкостроении и других областях [1, 2].

Понятие «высокоточные изделия» следует применять с учётом конкретной производ-

ственной ситуации, когда при сборке для значительной части узлов изделий не обеспечивается допуск замыкающего звена. Необходимо изготавливать дополнительные сборочные комплекты, увеличивается объём незавершённого производства [3].

На сегодняшний день наблюдаются разрозненные решения отдельных элементов этой проблемы в области повышения качества и точности собираемых изделий, снижения затрат на материалы, внедрения ресурсосберегающих технологий и т.п., при этом отсутствует отвечающая реальным требованиям концепция

комплексного подхода. Например, для решения проблемы обеспечения точности высокоточных изделий применяются методы регулирования и пригонки. При этом существенно увеличивается трудоёмкость и себестоимость сборки, кроме того, не всегда эти методы можно реализовать в высокоточных сборочных единицах изделий. Применение селективной сборки также предполагает определённый объём незавершённого производства (особенно в условиях мелкосерийного производства) и приводит к повышению себестоимости изделий. Также следует отметить, что традиционное проектирование технологических процессов механической обработки и сборки носит субъективный характер. Технолог не способен рассмотреть все возможные варианты изготовления деталей и сборки изделий и выбрать из них наиболее рациональные. Данное обстоятельство связано с временными ограничениями и физиологическими особенностями, которые не позволяют человеку конкурировать с современной вычислительной техникой по быстродействию принятия решений и объёму обрабатываемой информации.

В настоящее время разработана система автоматизированного планирования технологических процессов (САПлТП) [4], в основе которой лежит метод синтеза проектных решений с применением концепции гибких технологических процессов (ТП), что обеспечивает многовариантное проектирование технологических операций и ТП в автоматическом режиме с учетом реального состояния производственной системы. Однако недостатком является то, что в разработанной системе планирования и подготовки производства отсутствует связь между многовариантным проектированием ТП изготовления деталей, входящих в сборочную единицу, и требованиями, предъявляемыми к технологии и точности сборки высокоточной сборочной единицы, на основе которой можно эффективно решить проблему снижения объёма незавершённого производства и себестоимости сборки. Кроме того, в

данной системе не учитывается связь между конструкторской и технологической подготовками производства. Поэтому тема исследования можно считать актуальной.

Целью работы является формирование принципов интеграции компонентов технологической подготовки механообработки и сборки высокоточных изделий.

Задачи работы:

- установление взаимосвязи между технологической подготовкой механообрабатывающего и механосборочного производств, с целью учёта требований к сборке и технологических возможностей оборудования;
- формирование комплекса проектных процедур системы учета требований к сборке при проектировании ТП механической обработки (СТСТПМ);
- формирование процедуры выбора рациональных ТП механической обработки деталей с учетом ограничений, накладываемых требованиями к сборке высокоточных изделий, и складывающейся производственной ситуации;
- разработка алгоритмов и программного обеспечения для реализации сформированных процедур при подготовке производства.

Материалы и методы

В данной работе предлагается следующий подход к решению поставленных задач – комплекс формализованных проектных процедур СТСТПМ, основанный на установленной взаимосвязи между технологической подготовкой механообрабатывающего и сборочного производств (указанная взаимосвязь приведена на рис. 1) [3, 5, 6]. Данная система (в общем виде приведена на рис. 2) включает в себя три укрупненных блока проектных процедур: анализ высокоточного изделия и требований к его сборке; анализ возможных технологических процессов обработки деталей, входящих в высокоточную сборочную единицу; выбор на основе анализа рациональных технологических процессов обработки деталей.



Рис. 1. Связь между технологической подготовкой механообрабатывающего и сборочного производств

Fig. 1. The relationship between the design process of machining operation and assembling

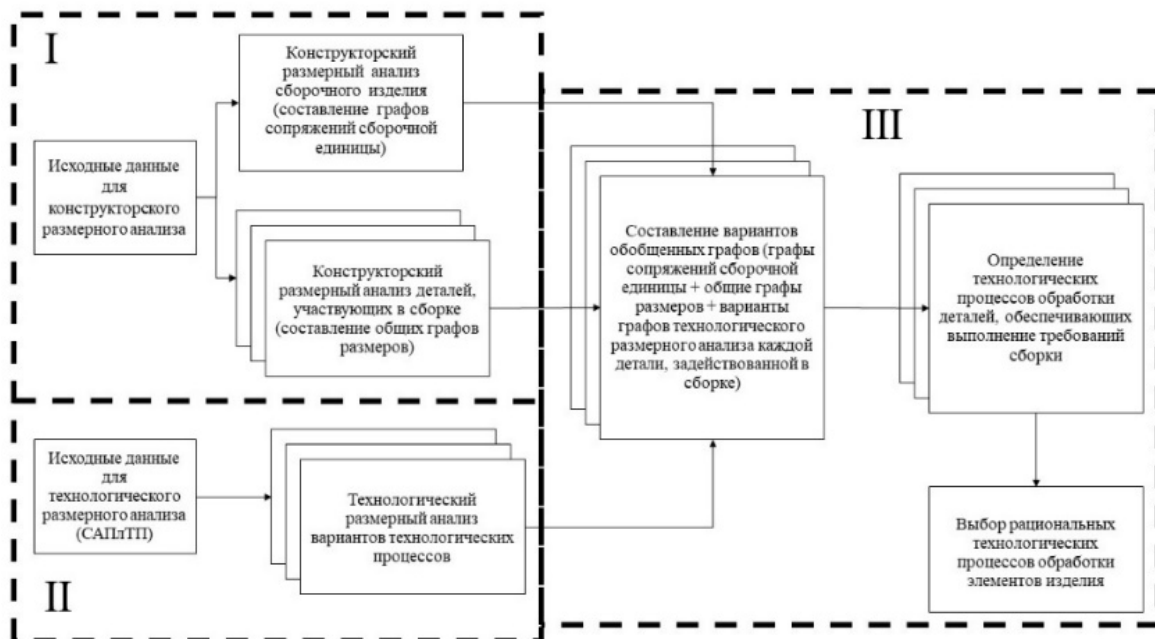


Рис. 2. Структура СТСТПМ в общем виде

Fig. 2. The general structure of the STSTPM

Процедура анализа высокоточного изделия и требований к его сборке включает в себя следующие этапы: разбиение высокоточного изделия или сборочной единицы на структурные элементы; определение всех возможных плоскостей для проведения конструкторского размерного анализа; определение всех возможных выходных геометрических параметров, замыкающих звеньев, а также необходимых для расчета размеров комплектующих деталей – составляющих звеньев, принадлежащих дан-

ным плоскостям; выявление тех требований к сборке, которые не могут быть обеспечены методом полной взаимозаменяемости.

Для выявления критичных (особо ответственных) требований к сборке изделия была предложена комбинированная стратегия [7]. На первом этапе реализации предложенной стратегии устанавливается взаимосвязь критичных требований к сборке исходного изделия и критичных требований к сборке составных структурных элементов. На втором этапе

осуществляется анализ критичных требований к сборке остальных структурных элементов.

Конструкторский размерный анализ заключается в построении графов сборочных единиц (графов сопряжений) $G_C = (A, B)$ и графов размерного анализа деталей, входящих в данные сборочные единицы (графов размеров) $G_P^j = (C, D)$ (индекс j обозначает номер детали в сборке) с последующим расчетом замыкающих звеньев. Граф размеров рассматривается как результат развертки графа сопряжений до уровня геометрических контуров, образующих элементы изделия. Граф сопряжений, в свою очередь, представляет собой свертку графа размеров. В результате получаем объединение графов (графы размеров являются элементами графа сопряжений) [8]

$$G_P^1, G_P^2, \dots, G_P^n \in G_C = G_{CP}. \quad (1)$$

Для формирования и расчета критичных требований к сборке была разработана индексация замыкающих и составляющих звеньев размерных цепей [7]. Так $B_{k,l}^{i,j}$ расшифровывается следующим образом: B – требования к сборке (замыкающие звенья); индекс i – порядковый номер требования ($i = 1 \dots n_1$); индекс j – номер плоскости, к которой принадлежит данное требование ($j = 1 \dots n_2$); индекс k – порядковый номер изделия ($k = 1 \dots n_3$); индекс l – порядковый номер сборочной единицы или структурного элемента ($l = 0 \dots n_4$). $A_{k_1,m}^{i_1,j}$ расшифровывается как: A – составляющие звенья конструкторской размерной цепи; индекс i_1 – порядковый номер составляющего звена ($i_1 = 1 \dots n_5$); индекс k_1 – номер детали ($k_1 = 0 \dots n_6$); m – порядковый номер размера в детали ($m = 1 \dots n_6$). Исходя из представленных принципов расчленения изделия, следует сделать уточнение: индекс k_1 для базовой детали (сборочной единицы) всегда будет принимать значение $k_1 = 1$.

Из сформированного множества требований к сборке необходимо выявить те, которые удовлетворяют следующему условию

$$TB_{k_1,l}^{i,j} < \sum_{i=1}^{n_9} TA_{k_1,m}^{i_1,j} \quad (2)$$

Таким образом, в результате реализации блока процедур получены комплекты деталей,

размеры которых участвуют в расчете каждого из требований к сборке, которые не могут быть обеспечены методом полной взаимозаменяемости. Далее в САПЛТП необходимо получить все возможные варианты ТП изготовления данных деталей для проведения технологического размерного анализа.

Технологический размерный анализ заключается в построении графов возможных вариантов ТП изготовления деталей $G_T^{j_1 j_3} = (B_T, C_T)$, где j_3 – номер варианта ТП для детали ($j_3 = 1 \dots n_3$).

В результате реализации процедуры для каждой детали сгенерированы варианты систем уравнений номинальных размеров и припусков.

На заключительном этапе составляются варианты обобщенных графов, включающие в себя графы конструкторского размерного анализа сборочных единиц и деталей, а также варианты графов технологического размерного анализа каждой детали, задействованной в сборке. Графы технологического размерного анализа вариантов ТП являются элементами объединенного графа сопряжений и размеров

$$G_T^{j_1,1}, G_T^{j_1,2}, \dots, G_T^{j_1,3} \in G_{CP}. \quad (3)$$

На основе проведенного размерного анализа необходимо выбрать множество ТП изготовления деталей, удовлетворяющих требованиям сборки. Критерий выбора – получение максимально возможного числа сборочных комплектов $W_{СК} = \max \{d_i\}$, где d_i – число сборочных комплектов. Далее, из ТП, удовлетворяющих требованиям сборки, должен определяться вариант рационального ТП, учитывающий, помимо прочего, складывающуюся производственную ситуацию.

Выбор варианта рационального ТП предлагается осуществлять по следующим критериям: количество операций ТП изготовления деталей $W_{оп}$; общее количество технологических переходов для каждого из ТП изготовления деталей $W_{пер}$; однородность технологического оборудования $W_{отд}$.

Выбор рационального ТП предлагается осуществлять известным методом многокритериальной оптимизации по критерию Парето с применением генетического алгоритма [9, 10]

для определения весовых коэффициентов важности каждого из критериев.

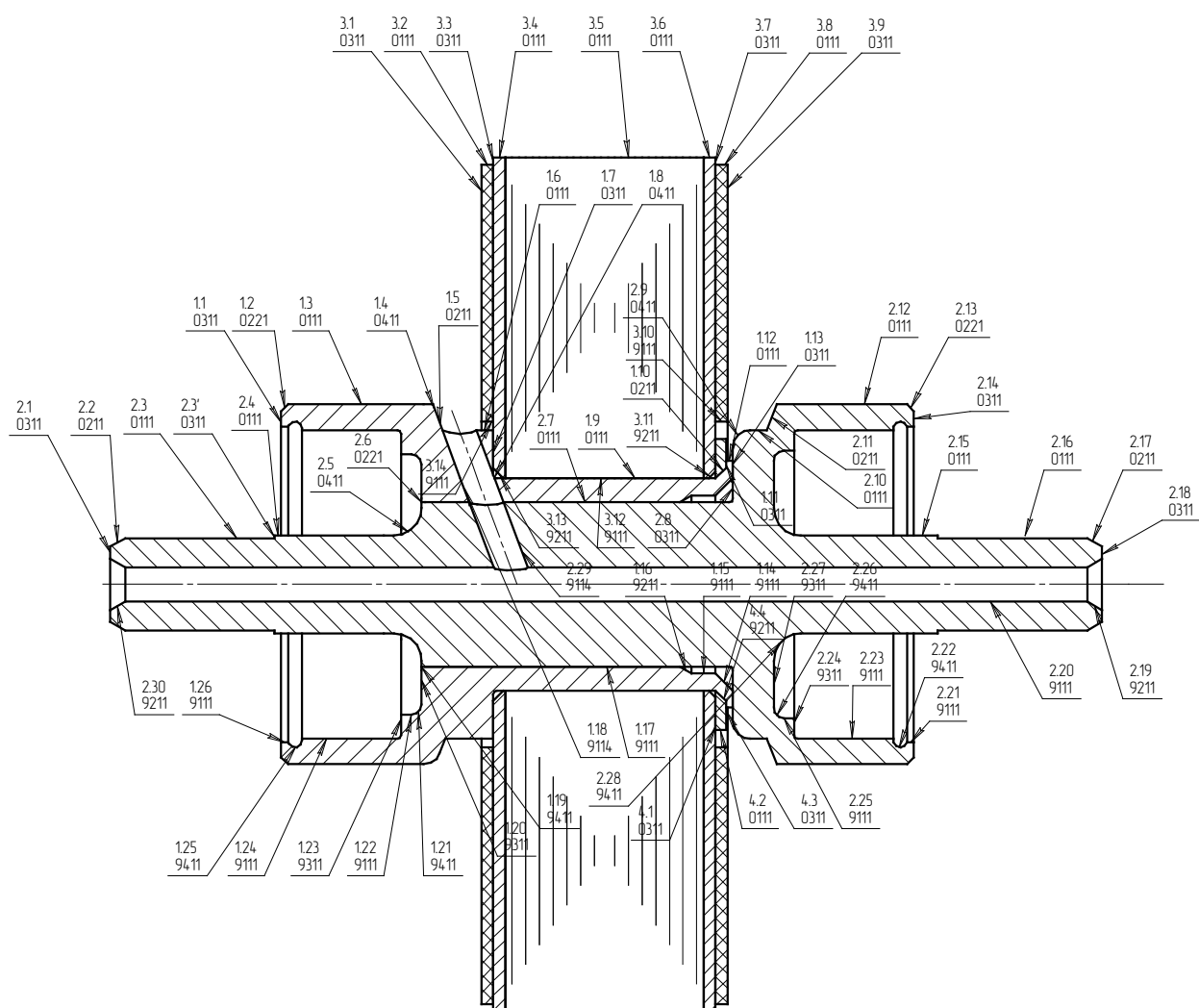
Результаты и обсуждение

Таким образом, были сформированы методическое и математическое обеспечение для реализации укрупненных блоков проектных процедур. На их основе было разработано алгоритмическое и программное обеспечение для проверки работоспособности полученной системы.

В настоящее время разработано методическое обеспечение [11] для реализации ком-

бинированной стратегии выявления критичных (особо ответственных) требований к сборке высокоточных изделий, основанное на построении обобщенного графа поверхностей, которое включает в себя выполнение следующих последовательных проектных этапов:

1. Нумерация поверхностей деталей и сборочных единиц (ДСЕ) с указанием кода для каждой поверхности в соответствии с требованиями САПЛТП (на рис. 3 данная процедура проведена для сборочной единицы «Пакет статора 2»).



3. На граф накладываются все требования к сборке, предъявляемые к данной сборочной единице, с указанием замыкающих и направлением составляющих звеньев с указанием точностных характеристик данных звеньев.

4. На графе указывают основные допуски формы и расположения, предъявляемые к поверхностям ДСЕ, а также базовые поверхности.

5. На графе определяется характер контактирующих поверхностей в соответствии с классификацией, разработанной на основе классификации модулей рабочих, базующих и связующих поверхностей, предложенной профессором Базровым Б.М [12].

Пример полученного обобщенного графа поверхностей для сборочной единицы «Пакет статора 2» приведен на рис. 4.

Следующим шагом проводимого исследования планируется создания математических моделей и алгоритмического обеспечения для реализации рассматриваемой методики.

Реализация комбинированной стратегии в рамках СТСТПМ позволит оптимизировать выполнение первого укрупненного блока проектных процедур по выявлению критичных (особо ответственных) требований к сборке высокоточных изделий.

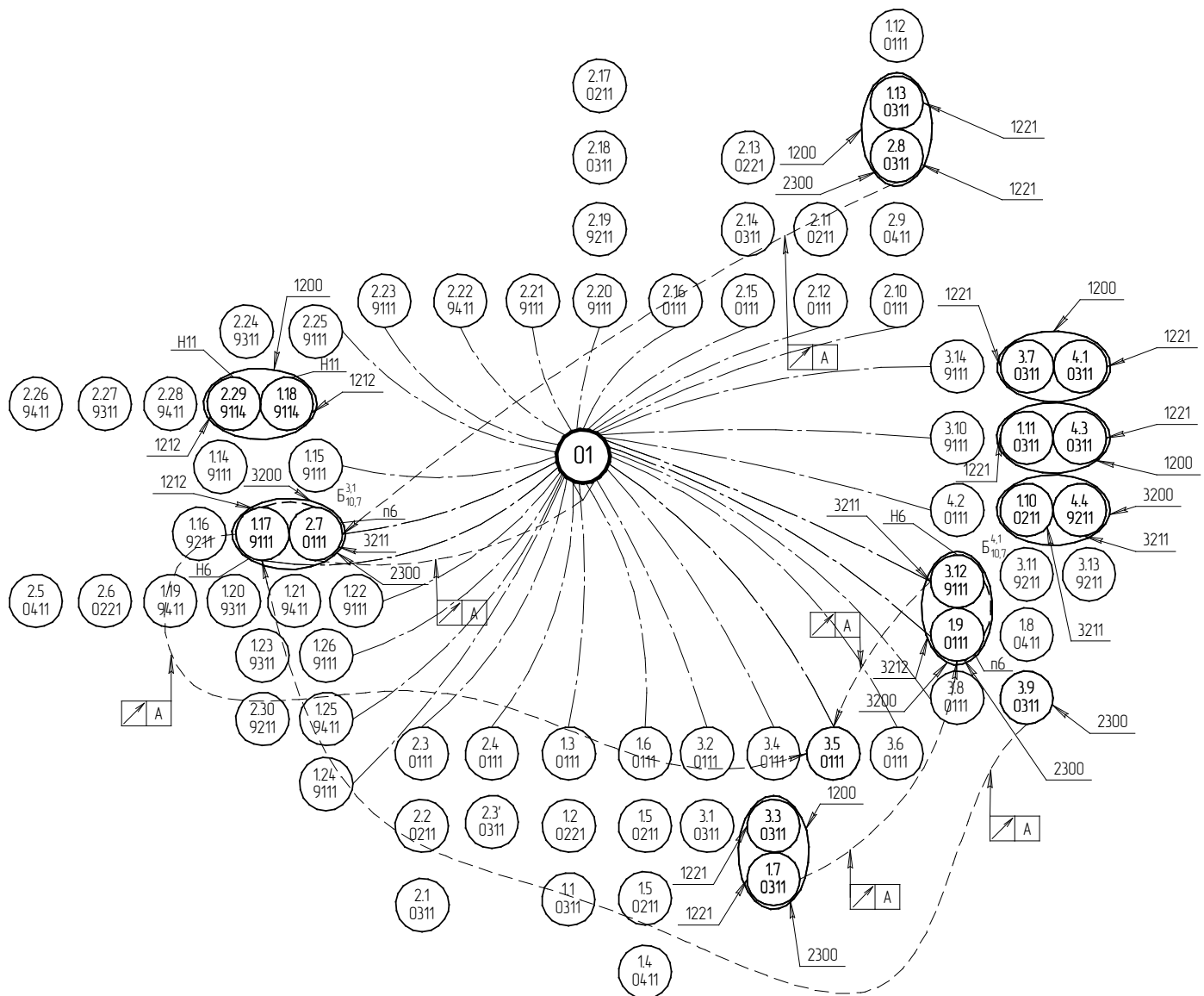


Рис. 4. Обобщенный граф поверхностей сборочной единицы «Пакет статора 2»

Fig. 4. Generalized graph of surfaces of AU (assembly units) surfaces «Stator package 2»

Заключение

Результатами экспериментов подтверждена работоспособность разработанного комплекса проектных процедур. Расчёт технико-экономических показателей показал, что полученные рациональные варианты ТП изготовления деталей обеспечивают сокращение времени последующей сборки высокоточных изделий за счет снижения количества итераций сборки, количество некомплектных деталей (незавершенное производство) в среднем снизилось на 15,5 %. Кроме того, повысилось качество сборки изделий. Проводится опытная апробация применения СТСТПМ в условиях действующих многономенклатурных производственных систем.

Создание научных основ реализации СТСТПМ способствует более глубокой цифровой трансформации конструкторской и технологической подготовки производства. Это, в свою очередь, создаёт условия для системного подхода к оценке производственной технологичности высокоточных изделий, а также для автоматизации проектирования ТП производства и сборки.

Перспективные направления дальнейших исследований связаны с расширением функционала разработанной системы и её адаптацией к различным типам производственных процессов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Суслов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2002. 684 с.
2. Базров Б.М. Основы технологии машиностроения: учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств» и направлению подготовки дипломированных специалистов «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств». М.: Машиностроение, 2005. 736 с.
3. Митин С.Г., Бочкарев П.Ю., Шалунов В.В., Разманов И.А. Определение рациональных уровней отсева вариантов проектных решений в системе автоматизированного планирования технологических процессов

// Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021. № 3 (57). С. 48–56.

4. Назарьев А.В., Бочкарев П.Ю. Математическое и методическое обеспечение реализации комплекса проектных процедур системы учета требований к сборке при проектировании технологических процессов механической обработки // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2020. № 8 (243). С. 35–39.

5. Назарьев А.В., Бочкарев П.Ю. Алгоритмическое обеспечение реализации комплекса проектных процедур системы учета требований к сборке при проектировании технологических процессов механической обработки // Справочник. Инженерный журнал. 2020. № 12 (285). С. 34–42.

6. Назарьев А.В., Бочкарев П.Ю. Разработка методического и математического обеспечения реализации стратегии выявления критичных требований к сборке высокоточных изделий // Frontier Materials & Technologies. 2022. № 4. С. 70–80.

7. Гречников Ф.В. Тлустенко С.Ф. Проектирование технологических процессов сборки по критериям точности // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2011. № 3 (27). С. 38–43.

8. Курейчик В.В. Перспективные архитектуры генетического поиска // Известия ТРТУ. 1998. № 2 (8). С. 53–56.

9. Догадина Е.П., Коноплев А.Н. Многокритериальное управление процессами мелкосерийного производства радиоэлектронной аппаратуры // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2011. № 13. С. 121–123.

10. Назарьев А.В., Бочкарев П.Ю. Принципы построения обобщенного графа поверхностей для реализации комбинированной стратегии выявления критичных требований к сборке высокоточных изделий // Современные технологии сборки: Доклады IX Международного научно-технического семинара, Москва, 16–17 октября 2025 года. М.: Московский политехнический университет 2025. С. 24–30.

11. Базров Б.М. Базис технологической подготовки машиностроительного производства. М.: ООО изд-во «КУРС», 2023. 324 с.

12. Назарьев А.В., Бочкарев П.Ю. Методика выявления критичных требований к сборке высокоточных изделий на основе построения обобщенного графа поверхностей // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 3 (169). С. 27–41.

REFERENCES

1. Suslov A.G., Dalsky A.M. Scientific fundamentals of engineering techniques. Moscow: Mashinostroyeniye, 2002. 684 p.

2. Bazrov B.M. Fundamentals of mechanical engineering technology: a textbook for university students studying in the bachelor's and master's degree programs «Technology, equipment and automation of machine-building industries» and the graduate training program «Design and technological support of machine-building industries» Moscow: Mashinostroenie, 2005. 736 p.
3. Mitin S.G., Bochkarev P.Yu., Shalunov V.V., Razmanov I.A. Determination of sustainable levels of design alternatives selection in the workflow cap system // Science Vector of Togliatti state university. 2021. No. 3 (57). pp. 48–56.
4. Nazariev A.V., Bochkarev P.Y. Mathematical and methodical implementation of the consolidated analysis of the requirements for the assembly of high-precision products in the design of mechanical processing processes // Proceedings of Volgograd State Technical University. 2020. No. 8 (243). pp. 35–39.
5. Nazariev A.V., Bochkarev P.Y. Algorithmic implementation of the complex of design procedures of the system of accounting requirements for assembly in design of manufacturing methods of mechanical processing. Guidance. Engineering magazine. 2020. No. 12 (285). pp. 44–42.
6. Nazariev A.V., Bochkarev P.Y. Development of methodological and mathematical support for the implementation of a strategy for identifying critical requirements for the assembly of high-precision products // Frontier Materials & Technologies. 2022. № 4. pp. 70–80.
7. Grechnikov F.V. Tlustenko S.F. Designing the assembly processes upon the precision criterion // Bulletin of the Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolev (National Research University). 2011. No. 3 (27). pp. 38–43.
8. Kureichik V.V. Promising architectures of genetic search // Izvestiya TRTU. 1998. No. 2 (8). pp. 53–56.
9. Gugadina E.P., Konoplev A.N. Multicriteria control of small-scale production of radio electronic equipment. // Methods and devices of information transmission and processing. 2011. No. 13. pp. 121–123.
10. Nazariev A.V., Bochkarev P.Y. Principles of constructing a generalized graph of surfaces for the implementation of a combined strategy for identifying critical requirements for the assembly of high-precision products // Modern assembly technologies: proc. of the IX-th International Scientific and Technical Seminar, Moscow, October 16–17, 2025. Moscow: Moscow Polytechnic University 2025. pp. 24–30.
11. Bazrov B.M. The basis of technological preparation of machine-building production. Moscow: OOO publishing house «COURSE», 2023. 324 p.
12. Nazariev A.V., Bochkarev P.Y. Methodology for identifying critical requirements for the assembly of high-precision products based on the construction of a generalized graph of surfaces // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025. No. 3 (169). pp. 27–41.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.02.2026; одобрена после рецензирования 10.03.2026; принята к публикации 22.03.2026.

The article was submitted 22.02.2026; approved after reviewing 10.03.2026; assepted for publication 22.03.2026.