

Разработка методического и математического обеспечения реализации стратегии выявления критичных требований к сборке высокоточных изделий

© 2022

Назарьев Александр Викторович*^{1,4}, кандидат технических наук, инженер-конструктор 1-й категории
Бочкарев Петр Юрьевич^{2,3,5}, доктор технических наук, профессор

¹Филиал АО «Научно-производственный центр автоматизации и приборостроения имени академика Н.А. Пилюгина» – «Производственное объединение "Корпус"», Саратов (Россия)

²Камышинский технологический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, Камышин (Россия)

³Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова, Саратов (Россия)

*E-mail: alex121989@mail.ru

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0610-6060>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0587-6338>

Поступила в редакцию 06.06.2022

Принята к публикации 27.08.2022

Аннотация: Проблема совершенствования изготовления высокоточных приборов и машин приобрела первоочередное значение. Это обусловлено тем, что предъявляются постоянно возрастающие требования к качеству и точности изготовления подобных устройств, а традиционные подходы, предназначенные обеспечивать данные критерии, не являются в достаточной степени универсальными. Решить указанные проблемы позволяет разработанный подход – комплекс формализованных проектных процедур системы учета требований к сборке высокоточных изделий при проектировании технологических процессов механической обработки. Однако необходимо разработать дополнительные решения для обеспечения связи между конструкторской и технологической подготовкой производства. Актуальность работы определяется решением важной проблемы – совершенствования процедуры проведения конструкторского размерного анализа в рамках системы учета требований к сборке высокоточных изделий при проектировании технологических процессов механической обработки. Для решения предложена методика расчленения высокоточного изделия, основанная на выявлении базовой детали / сборочной единицы, и уточнена математическая модель формирования графа сопряжений и графа размеров, необходимая для выявления критичных (особо ответственных) требований к сборке и проведения конструкторского размерного анализа. Внедрение предложенных методик позволит выбирать рациональные технологии изготовления деталей на последующих этапах реализации проектных процедур системы учета требований к сборке высокоточных изделий при проектировании технологических процессов механической обработки. Это, в свою очередь, приведет к снижению трудоемкости и сокращению времени изготовления высокоточных изделий, повысит их качество и точность, а также позволит снизить издержки при конструкторско-технологической подготовке в условиях многономенклатурного производства.

Ключевые слова: конструкторско-технологическая подготовка производства; высокоточное изделие; сборка; конструкторский размерный анализ; базовая деталь; базовая сборочная единица.

Для цитирования: 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. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-4-70-80.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при сборке изделий в основном применяются традиционные методы взаимозаменяемости (полной, неполной, групповой) или методы с применением компенсаторов (регулирование, пригонка). Однако для обеспечения выходных параметров (требований к сборке) высокоточных изделий применение данных методов зачастую становится трудно реализуемой задачей, так как требует значительно уменьшать допуски на составляющие звенья или применять компенсацию, что экономически необоснованно [1–3].

В данной работе под термином «высокоточное изделие» подразумевается такое изделие, при сборке которого для значительной части элементов (узлов, сборочных единиц) не обеспечивается допуск замыкающе-

го звена (выходных параметров, или критичных требований к сборке). В результате для выполнения производственной программы необходимо изготавливать дополнительные сборочные комплекты, которые увеличивают объем незавершенного производства [4].

Кроме того, проектирование технологических процессов механообработки и сборки с помощью традиционных подходов в основном 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 быстрдействию принятия решений и объему обрабатываемой информации [2; 5; 6].

В связи с этим возникает необходимость разработать комплексные подходы для решения проблем обеспечения качества и точности изделий (особенно высокоточных) и интеллектуализации конструкторско-технологической подготовки производства, позволяющие проектировать рациональные технологии изготовления деталей с учетом требований к последующей сборке и складывающейся на предприятии оперативной производственной ситуации.

Одним из возможных решений описанных проблем является применение принципов параллельной инженерной разработки и процедуры оценки выбора эффективного технологического процесса на этапе технологической подготовки производства [7]. Однако такой подход имеет определенные недостатки. В частности, не в полной мере обеспечен учет информации о технологических возможностях конкретного производства при принятии конструкторских решений и рассмотрены преимущественно основные количественные показатели производственной технологичности [8; 9].

Другое возможное решение указанной проблемы – применение метода сквозного технологического проектирования [10; 11]. Однако при реализации указанного подхода отсутствует учет связи между технологической подготовкой механообрабатывающего и механосборочного производств и не в полной мере реализован учет связи между конструкторской и технологической подготовками производства.

Для реализации учета связи между технологической подготовкой механообрабатывающего и механосборочного производств нами был разработан формализованный комплексный подход – система учета требований к сборке высокоточных изделий при проектировании технологических процессов механической обработки (принятая нами аббревиатура – СТСТПМ) [12]. Однако в связи с необходимостью установления взаимосвязи

между конструкторской и технологической подготовками многономенклатурного производства, а также для перехода к оценке производственной технологичности изделий и более глубокой интеграции данной системы в структуру системы автоматизированного планирования технологических процессов (САПЛТП) [13] требуется поиск путей совершенствования существующих подходов разработанной системы.

В [4] нами были предложены подходы к реализации укрупненного блока проектных процедур анализа высокоточного изделия и выявления критичных (особо ответственных) требований к сборке (в том числе процедуры проведения конструкторского размерного анализа (КРА)). В данной статье рассмотрены принципы совершенствования разработанных методик и обеспечения их формализации.

Цель исследования – разработка методик и математических моделей для совершенствования подходов к реализации укрупненного блока проектных процедур анализа высокоточного изделия и выявления критичных (особо ответственных) требований к сборке в рамках разработанной системы учета.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Этапы реализации процедуры анализа высокоточного изделия и выявления критичных (особо ответственных) требований к сборке представлены в виде иерархической структуры на рис. 1 [6].

Для выявления особо ответственных требований к сборке высокоточного изделия была предложена комбинированная стратегия [14], последовательность реализации которой показана на рис. 2. Согласно представленной методике реализация укрупненного блока проектных процедур проведения КРА начинается

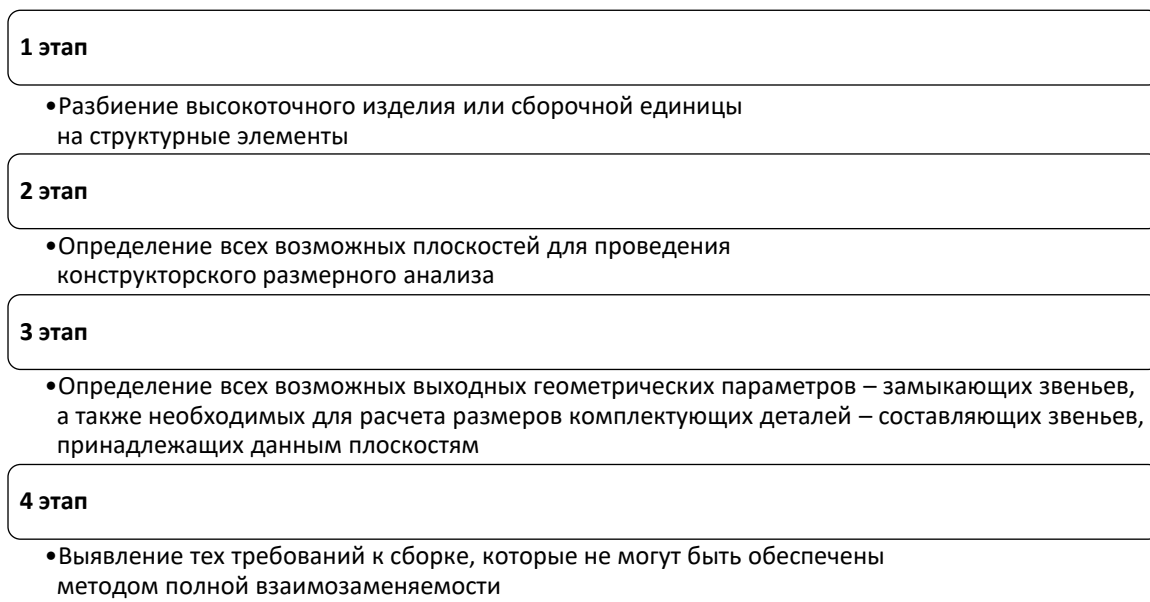


Рис. 1. Иерархическая структура реализации процедуры анализа высокоточного изделия и выявления критичных требований к сборке

Fig. 1. Hierarchical structure of implementing the procedure for the analysis of a highly-precise good and identification of critical requirements to the assembly

Уровень 1

- Исходное изделие
- Выявление деталей-маркеров
- Разбиение исходного изделия на структурные элементы
- Определение плоскостей для проведения КРА
- Формирование всех требований к сборке
- Выявление критичных (особо ответственных) требований

Уровень 2

- Формирование множества структурных элементов, выявленных на 1 уровне
- Формирование взаимосвязи критичных требований к сборке исходного изделия и критичных требований к сборке составных структурных элементов. Формирование множества недействующих структурных элементов
- Выявление деталей-маркеров для каждого из структурных элементов сформированных множеств
- Разбиение каждого структурного элемента из сформированных на составные структурные элементы
- Определение плоскостей для проведения КРА
- Формирование всех требований к сборке
- Выявление критичных (особо ответственных) требований для полученных множеств

... ..

Уровень n

- Формирование множества структурных элементов, выявленных на (n-1) уровне
- Формирование взаимосвязи критичных требований к сборке элементов изделия, полученных на предыдущих уровнях, и критичных требований к сборке составных структурных элементов, выявленных на уровне (n-1). Формирование множества недействующих структурных элементов
- Выявление деталей-маркеров
- Разбиение каждого структурного элемента из исходного множества на составные структурные элементы
- Определение плоскостей для проведения КРА
- Формирование всех требований к сборке
- Выявление критичных (особо ответственных) требований для полученных множеств

Уровень (n+1)

- Формирование множества критичных (особо ответственных) требований к сборке высокоточного изделия, выявленных на всех уровнях с учетом установленной взаимосвязи
- Формирование множества критичных (особо ответственных) требований к сборке высокоточного изделия выявленных на всех уровнях остальных структурных элементов
- Сравнение полученных множеств. Отсев дублирующих элементов. Объединение множеств

Рис. 2. Последовательность реализации комбинированной стратегии
Fig. 2. The subsequence of implementing a combined strategy

с разбиения высокоточного изделия на структурные элементы. Структурный элемент – элемент сборочной единицы или сборочная единица в целом с определенным функциональным назначением. Классификация структурных элементов по функциональному назначению приведена на рис. 3 [Привод. по: 4, с. 20]. Детальное описание указанной классификации изложено в [4] и в данной работе подробно освещаться не будет.

Для того чтобы корректно определить функциональное назначение и совершить процедуру разбиения на структурные элементы, необходимо определить детали-маркеры высокоточного изделия, узла или сборочной единицы. Под терминами «детали-маркеры», «сборочные единицы – маркеры», «узлы-маркеры» подразумеваются детали, сборочные единицы или узлы, входящие в состав рассматриваемого изделия, которые определяют его функциональное назначение и к которым предъявляется большая часть требований к сборке. В качестве деталей-маркеров целесообразно использовать детали для передачи движения, так как они дают наиболее четкое представление о функциональном назначении изделия (узла, сборочной единицы) [4]. Уточним методику выявления данных деталей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно требованиям ГОСТ 23887-79 (Сборка. Термины и определения) сборка любого изделия начинается с определения базовой детали или базовой сборочной единицы.

Базовой деталью / сборочной единицей называется такая деталь / сборочная единица, с которой начинают сборку изделия, присоединяя к ней сборочные единицы или другие детали.

Базовая деталь / сборочная единица будет во многом определять функциональное назначение изделия, а к ее сопряжению с другими деталями и сборками будет предъявляться большая часть требований. Таким образом, любая базовая деталь / сборочная единица является для изделия и деталью-маркером. Кроме того, сопряжения данных деталей / сборочных единиц с другими элементами сборки будут осуществляться по тем поверхностям, которые определяют характер структурного элемента, исходя из представленной классификации [15–17].

Базовая сборочная единица выделяется в том случае, если невозможно однозначно выделить деталь, с которой начинался бы процесс сборки и которая однозначно определяла бы функциональное назначение изделия. Процессы разбиения сборки на структурные элементы, начинающиеся с базовой детали и с базовой сборочной единицы, представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

Стоит сделать следующее уточнение: несмотря на то, что базовая деталь / сборочная единица всегда является деталью-маркером, это не означает, что в рассматриваемом изделии не может быть иных деталей-маркеров. Например, на рис. 4 представлен узел «Корпус 1 совместно с Гиromотором». В данном случае

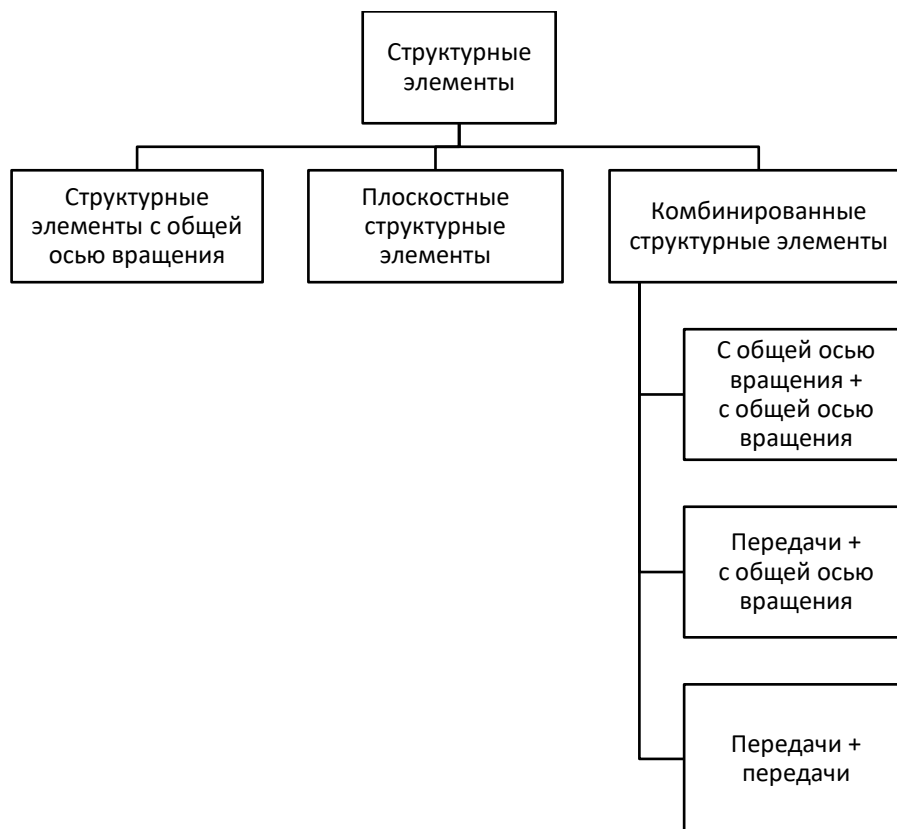


Рис. 3. Классификация структурных элементов по функциональному назначению
 Fig. 3. Classification of structural elements by functionality

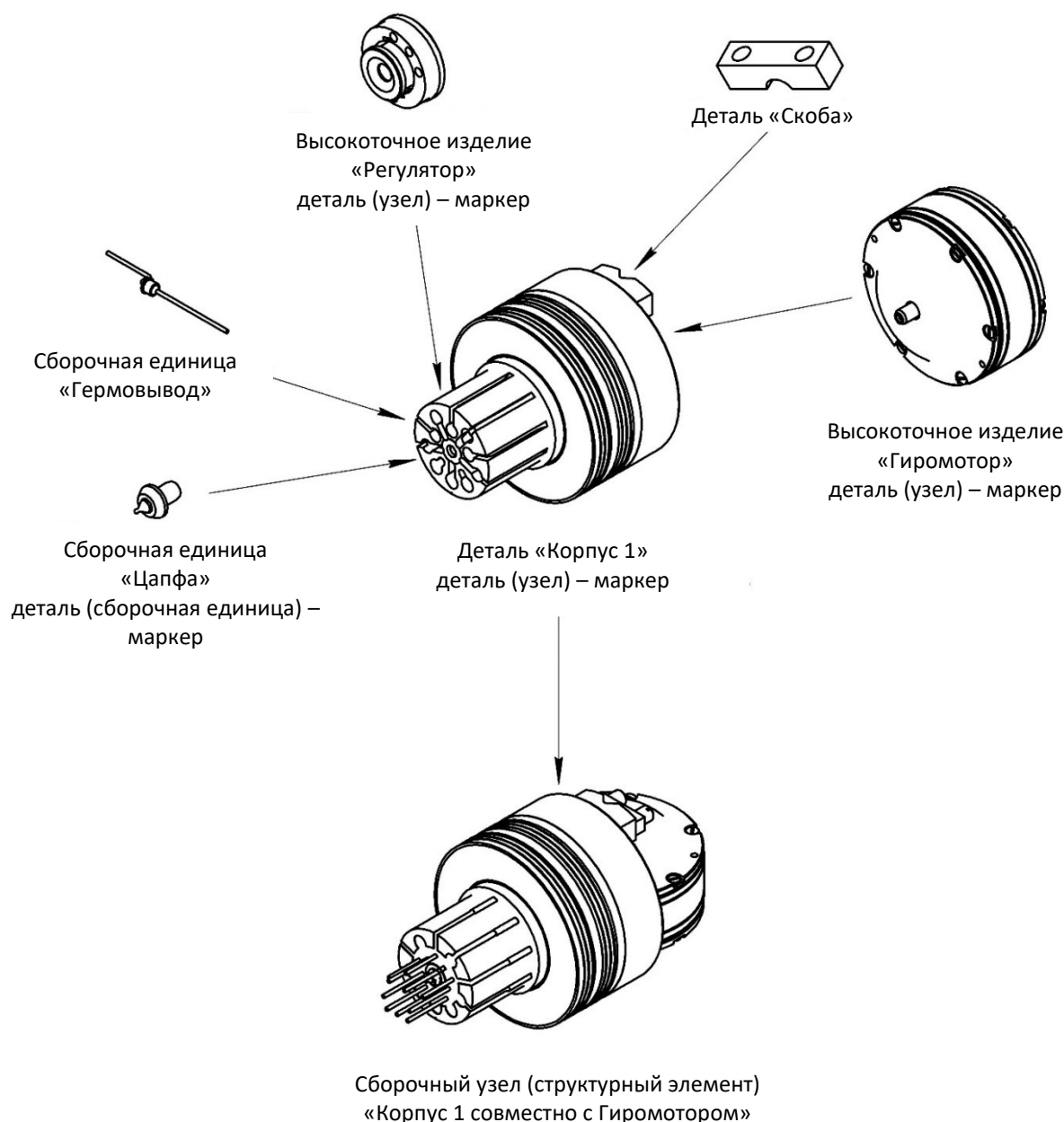


Рис. 4. Процесс разбиения узла «Корпус 1 совместно с Гиромотором», начинающийся с базовой детали
 Fig. 4. The process of separation of the "Body 1 together with Gyromotor" unit starting with the base element

базовая деталь «Корпус 1» будет играть роль детали-маркера. Однако полное представление о функциональном назначении данного узла дает сопряжение указанной детали-маркера со сборочным узлом-маркером «Гиромотор». Таким образом, мы получаем объединение двух деталей/узлов – тел вращения, соединенных под углом 90°, образующих впоследствии соответствующий комбинированный структурный элемент. Узел «Регулятор» и сборочная единица «Цапфа» также могут выступать в качестве маркеров. Однако по своему функциональному назначению они дублируют базовую деталь, поэтому их можно исключить из рассмотрения.

Разбиение изделия, узла, сборочной единицы позволяет выявить необходимые плоскости для проведения

конструкторского размерного анализа и сформировать множество требований к сборке изделия и его составных частей $M_{T.C.}$. Далее из полученного множества необходимо определить те его элементы, которые удовлетворяют условию

$$TБ_{k_1, l}^{i, j} < \sum_{i=1}^{n_0} TА_{k_1, m}^{i, j},$$

где Б – требования к сборке (замыкающие звенья); индекс i – порядковый номер требования ($i=1 \dots n_1$); индекс j – номер плоскости, к которой принадлежит данное требование ($j=1 \dots n_2$);

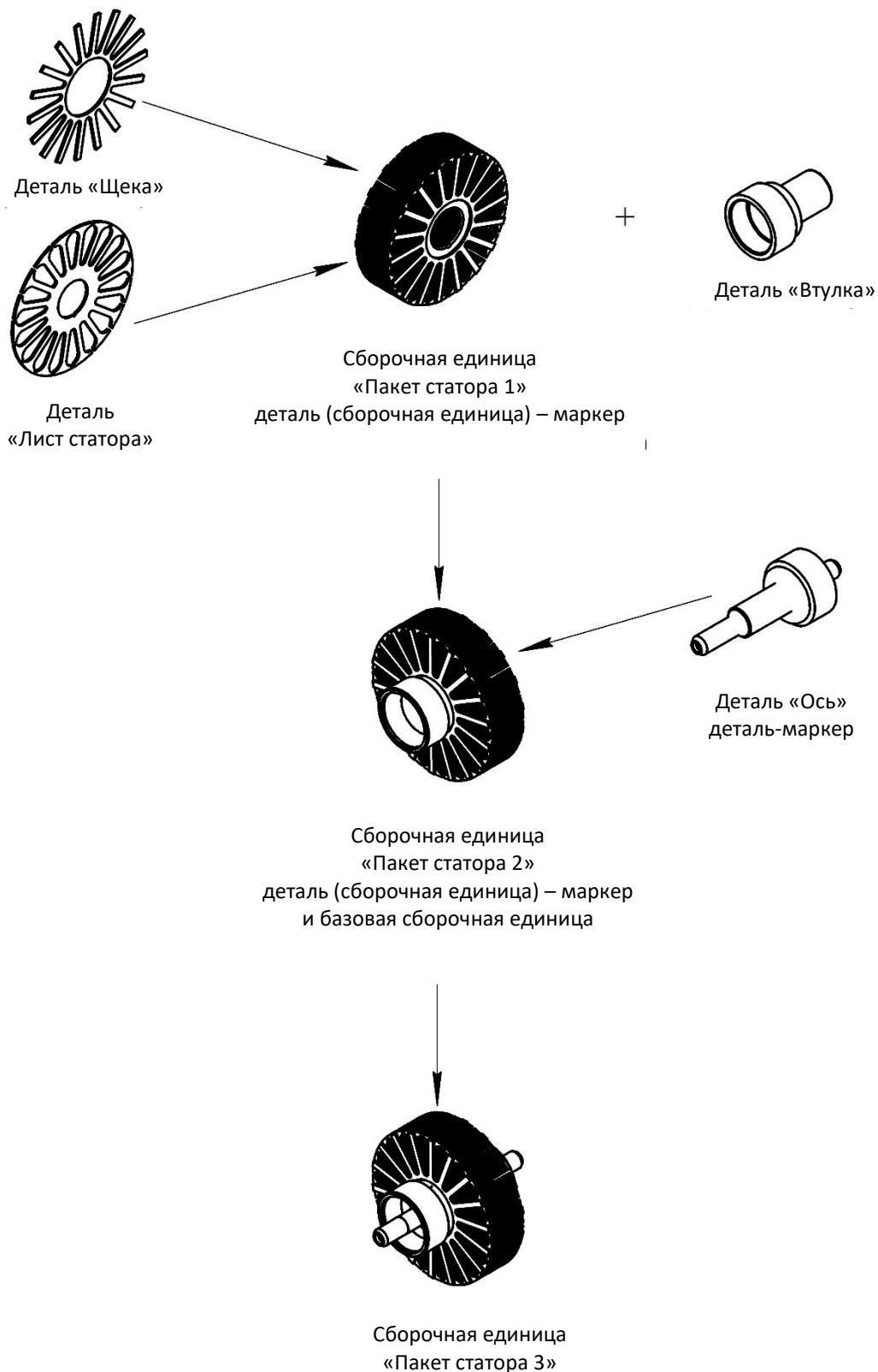
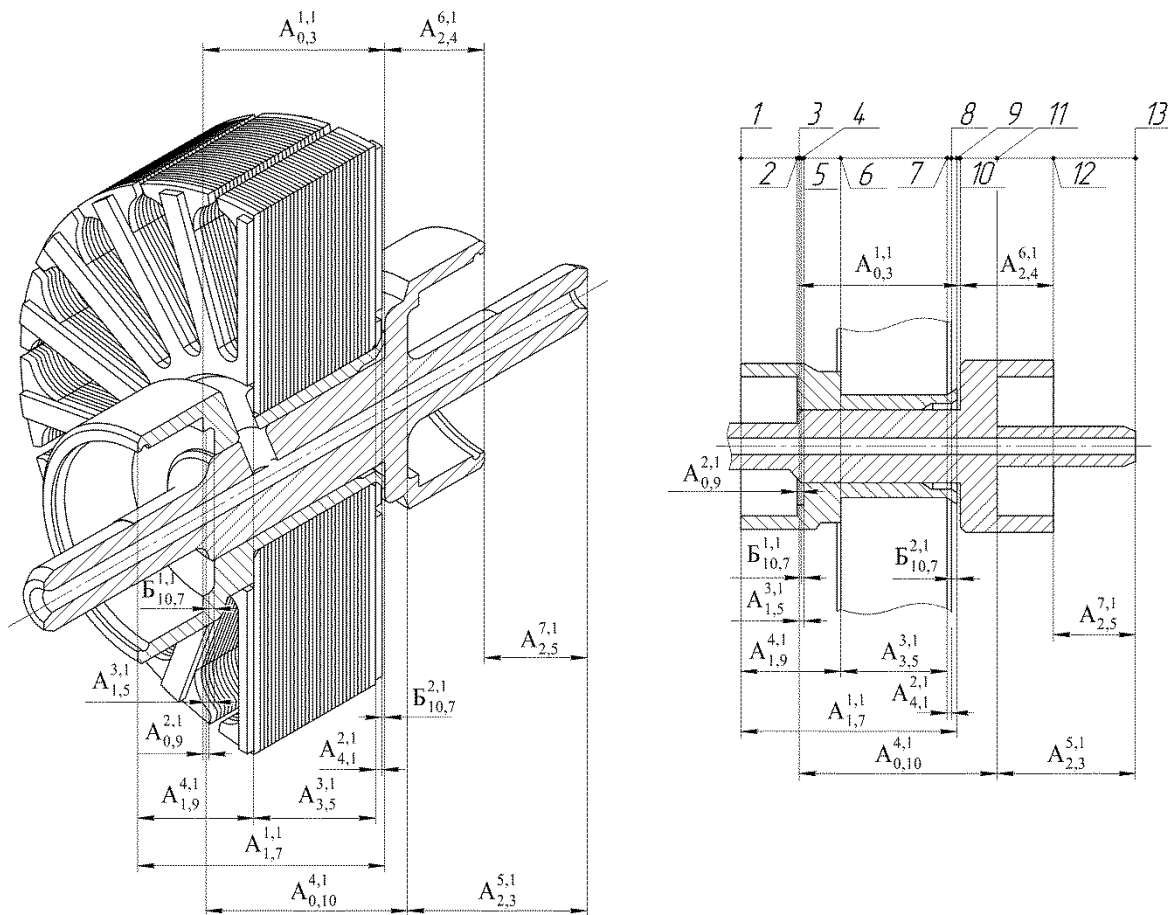
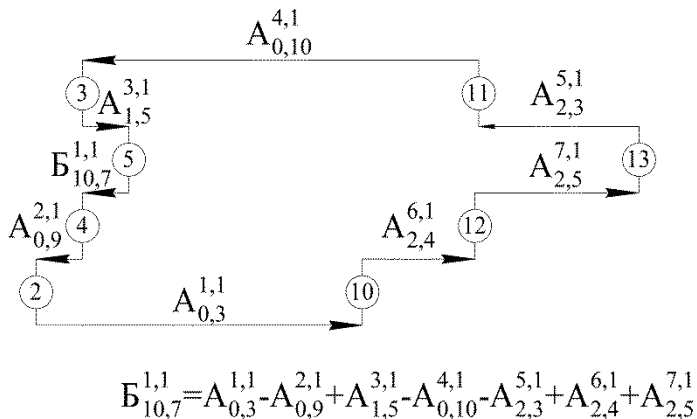


Рис. 5. Процесс разбиения сборочной единицы «Пакет статора 3», начинающийся с базовой сборочной единицы
Fig. 5. The process of separation of the “Stator pack 3” assembly unit starting with the base assembly unit



Примеры отдельных требований к сборке, которые не могут быть обеспечены методом полной взаимозаменяемости, формирующих граф сопряжений

Расчет положения фаски детали «Ось» в сборочной единице «Пакет статора»



Расчет сборочной единицы «Пакет статора 3» на завальцовку

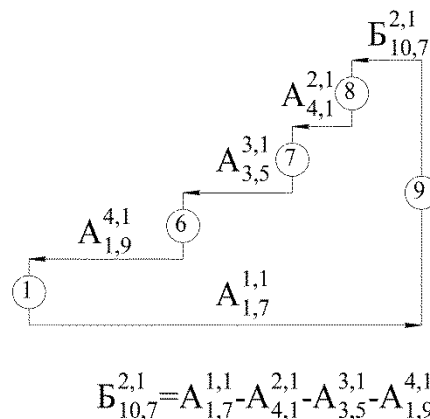


Рис. 6. Выбор секущей плоскости для структурного элемента «Пакет статора 3» и примеры отдельных критических требований к сборке

Fig. 6. The selection of a cutting plane for the "Stator pack 3" structural element and the examples of some critical requirements for the assembly

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 – составляющие звенья конструкторской размерной цепи;
 индекс i_l – порядковый номер составляющего звена ($i_l=1 \dots n_5$);
 индекс k_l – номер детали ($k_l=0 \dots n_6$);
 m – порядковый номер размера в детали ($m=1 \dots n_6$).

Данные элементы не обеспечиваются методом полной взаимозаменяемости и формируют соответствующее подмножество M_1 . Остальные элементы обеспечиваются методом полной взаимозаменяемости и формируют подмножество $M_{П.В.}$:

$$M_1 = \frac{M_{Т.С.}}{M_{П.В.}}$$

Далее необходимо определить характер элементов, составляющих подмножество M_1 , т. е. разбить его на соответствующие подмножества:

$$M_1 = M_{Н.В.} \cup M_{Г.В.} \cup M_{И.П.} \cup M_{РЕ},$$

где $M_{Н.В.}$ – подмножество требований к сборке, обеспечиваемое методом неполной взаимозаменяемости;
 $M_{Г.В.}$ – подмножество требований к сборке, обеспечиваемое методом групповой взаимозаменяемости;
 $M_{И.П.}$ – подмножество требований к сборке, обеспечиваемое методом индивидуальной пригонки;
 $M_{РЕ}$ – подмножество требований к сборке, обеспечиваемое методом регулирования.

Таким образом, множество требований к сборке M_1 (замыкающие звенья размерных цепей), которые не могут быть обеспечены методом полной взаимозаменяемости, формируют граф сопряжений $G_C=(B_C, C_C)$. При расчете размерных цепей все размеры детали в любом координатном направлении представляются в виде графа дерева (для сборочных единиц – в виде леса), откуда следует, что КРА заключается в построении графов размерного анализа сборочных единиц (графов сопряжений) и графов размерного анализа деталей, входящих в данные сборочные единицы (графов размеров):

$$G_P^i = (B_P, C_P).$$

Граф размеров является результатом развертки графа сопряжений до уровня геометрических контуров, образующих элементы изделия, а граф сопряжений, в свою очередь, является результатом свертки графа размеров. В результате получаем объединение графов (графы размеров являются элементами графа сопряжений) [18–20]:

$$G_P^1, G_P^2 \dots G_P^n \in G_C = G_{СР}.$$

Рассмотрим процесс выявления необходимых плоскостей и построения графа размеров и графа сопряжений на примере сборочной единицы (структурного элемента «Пакет статора 3» (рис. 5). Данный структурный

элемент, согласно приведенной классификации (рис. 3), можно отнести к типу структурных элементов с общей осью вращения, условно симметричных, так как базовая сборочная единица состоит из сопряжения деталей – тел вращения, соединенных между собой по одной оси. По функциональному назначению в узле служит для передачи вращательного движения. В качестве плоскости для проведения КРА данного структурного элемента выбирается секущая плоскость, проходящая через ось вращения. Выбор секущей плоскости для данного структурного элемента, а также фрагмент отдельных критичных требований к сборке, формирующих граф сопряжений данного изделия, представлены на рис. 6.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Формирование объединенного графа размеров – сопряжений позволяет выявить комплект деталей, размеры которых участвуют в КРА критичных требований к сборке высокоточного изделия. Далее в САПЛТП формируется множество возможных технологических процессов изготовления данных деталей, из которых, в свою очередь, в СТСТПМ выбираются наиболее рациональные на основе предложенной системы критериев [12], главным из которых является максимизация годных сборочных комплектов.

Работоспособность разработанного в рамках СТСТПМ методического, математического и алгоритмического обеспечения подтверждена промышленным экспериментом в условиях действующих механообрабатывающих и механосборочных производств. Совершенствование укрупненного блока проектных процедур анализа высокоточного изделия и выявления критичных (особо ответственных) требований к сборке позволит в дальнейшем повысить качество выбора рациональных технологических процессов.

Оценочный расчет: применение описанных методик и моделей обеспечивает сокращение временных затрат на сборку до 35 % и снижение количества незавершенного производства на 9–11 %.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Предложена и разработана методика расчленения изделия на структурные элементы, основанная на выявлении базовой детали / сборочной единицы.
2. Уточнена математическая модель формирования графа сопряжений и графа размеров высокоточного изделия, необходимая для выявления критичных (особо ответственных) требований к сборке и проведения конструкторского размерного анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bazrov V.M. Classification of objects of technological preparation in the machining production // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1047. № 1. Article number 12048. DOI: [10.1088/1757-899X/1047/1/012048](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1047/1/012048).
2. Суслов А.Г., Федонин О.Н., Петрешин Д.И. Фундаментальные основы обеспечения и повышения качества изделий машиностроения и авиакосмической техники // Вестник Брянского государственного

- технического университета. 2020. № 2. С. 4–10. DOI: [10.30987/1999-8775-2020-2020-2-4-10](https://doi.org/10.30987/1999-8775-2020-2020-2-4-10).
3. Варганов М.В., Чунг Т.Ч. Сборочное производство: проблемы и решения // Станкоинструмент. 2020. № 2. С. 22–29. DOI: [10.22184/2499-9407.2020.19.02.22.29](https://doi.org/10.22184/2499-9407.2020.19.02.22.29).
 4. Назарьев А.В., Бочкарев П.Ю. Совершенствование математического, методического и алгоритмического обеспечения реализации укрупненного блока проектных процедур анализа требований к сборке высокоточных изделий // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2020. № 4. С. 15–24. DOI: [10.18323/2073-5073-2020-4-15-24](https://doi.org/10.18323/2073-5073-2020-4-15-24).
 5. Lin P., Li M., Kong X., Chen J., Huang G.Q., Wang M. Synchronisation for Smart Factory – Towards IoT-enabled Mechanisms // International Journal of Computer Integrated Manufacturing. 2018. Vol. 31. № 7. P. 624–635. DOI: [10.1080/0951192X.2017.1407445](https://doi.org/10.1080/0951192X.2017.1407445).
 6. Сулов А.Г., Федонин О.Н., Медведев Д.М. Проектирование функционально ориентированных технологических процессов // Вестник машиностроения. 2019. № 9. С. 66–71. EDN: [TDBHLR](https://www.edn.net/TDBHLR).
 7. Растегаев Е.В. Требования к САПР ТП в условиях параллельной инженерной разработки // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2019. № 4. С. 69–73. EDN: [KXJQUX](https://www.edn.net/KXJQUX).
 8. Базров Б.М., Троицкий А.А. Система коэффициентов производственной технологичности конструкции изделия // СТИН. 2020. № 3. С. 22–26. EDN: [POUAVS](https://www.edn.net/POUAVS).
 9. Варганов М.В., Чушенков И.И. Методология оценки технологичности изделий машиностроения // Станкоинструмент. 2019. № 2. С. 14–23. DOI: [10.22184/2499-9407.2019.15.02.14.22](https://doi.org/10.22184/2499-9407.2019.15.02.14.22).
 10. Чигиринский Ю.Л. Математические методы в технологическом проектировании // Научные технологии в машиностроении. 2018. № 4. С. 13–20. EDN: [RRLRLZ](https://www.edn.net/RRLRLZ).
 11. Li X., Zhang S., Huang B., Huang R., Xu C., Zhang Y. A survey of knowledge representation methods and applications in machining process planning // International journal of advanced manufacturing technology. 2018. Vol. 98. № 9-12. P. 3041–3059. DOI: [10.1007/s00170-018-2433-8](https://doi.org/10.1007/s00170-018-2433-8).
 12. Назарьев А.В., Бочкарев П.Ю., Бокова Л.Г. Комплексный подход для выполнения технологической подготовки многономенклатурных механообработываемых производств на основе учета особенностей сборки высокоточных изделий // Справочник. Инженерный журнал. 2019. № 3. С. 35–42. DOI: [10.14489/hb.2019.03.pp.035-042](https://doi.org/10.14489/hb.2019.03.pp.035-042).
 13. 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. С. 48–56. DOI: [10.18323/2073-5073-2021-3-48-56](https://doi.org/10.18323/2073-5073-2021-3-48-56).
 14. Назарьев А.В., Бочкарев П.Ю. Формализация требований к высокоточным изделиям на этапах технологической подготовки механосборочных производств // Научные технологии в машиностроении. 2020. № 12. С. 39–45. DOI: [10.30987/2223-4608-2020-12-39-45](https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-12-39-45).
 15. Агафонова Е.Н., Захаров О.В. Классификация деталей машин с позиции их измерения // Современные материалы, техника и технологии. 2018. № 2. С. 12–16. EDN: [UPLJAY](https://www.edn.net/UPLJAY).
 16. Гаер М.А., Шабалин А.В. Геометрическая классификация деталей при анализе сборок с пространственными допусками // Известия МГТУ МАМИ. 2008. № 2. С. 355–361. EDN: [LHTCCX](https://www.edn.net/LHTCCX).
 17. Гаер М.А., Кузьмина Е.Ю. Конфигурационные многообразия квадратичных форм поверхностей деталей и сборок // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. № 2. С. 49–66. DOI: [10.26731/1813-9108.2019.2\(62\).59-66](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2019.2(62).59-66).
 18. Лелюхин В.Е., Колесникова О.В. Анализ и расчет размерных цепей на основе графов размерных связей // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2015. № 4. С. 29–34. EDN: [VAXTID](https://www.edn.net/VAXTID).
 19. Гречников Ф.В., Глушенко С.Ф. Проектирование технологических процессов сборки по критериям точности // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. 2011. № 3-4. С. 38–43. EDN: [OWYQOT](https://www.edn.net/OWYQOT).
 20. Chakraborty S., Chowdhury R. Graph-theoretic approach-assisted Gaussian process for nonlinear stochastic dynamic analysis under generalized loading // Journal of Engineering Mechanics. 2019. Vol. 145. № 12. Article number 04019105. DOI: [10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001685](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001685).

REFERENCES

1. Bazrov B.M. Classification of objects of technological preparation in the machining production. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1047, no. 1, article number 12048. DOI: [10.1088/1757-899X/1047/1/012048](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1047/1/012048).
2. Suslov A.G., Fedonin O.N., Petreshin D.I. Basic fundamental to ensure and increase quality of mechanical engineering and aerospace products. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2020, no. 2, pp. 4–10. DOI: [10.30987/1999-8775-2020-2020-2-4-10](https://doi.org/10.30987/1999-8775-2020-2020-2-4-10).
3. Vartanov M.V., Chung T.Ch. Assembly production: problems and solutions. *Stankoinstrument*, 2020, no. 2, pp. 22–29. DOI: [10.22184/2499-9407.2020.19.02.22.29](https://doi.org/10.22184/2499-9407.2020.19.02.22.29).
4. Nazaryev A.V., Bochkarev P.Yu. Improving mathematical, methodological, and algorithmic support of implementation of an enlarged block of design procedures for the analysis of requirements to the highly precise products assembly. *Science Vector of Togliatti State University*, 2020, no. 4, pp. 15–24. DOI: [10.18323/2073-5073-2020-4-15-24](https://doi.org/10.18323/2073-5073-2020-4-15-24).
5. Lin P., Li M., Kong X., Chen J., Huang G.Q., Wang M. Synchronisation for Smart Factory – Towards IoT-enabled Mechanisms. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2018, vol. 31, no. 7, pp. 624–635. DOI: [10.1080/0951192X.2017.1407445](https://doi.org/10.1080/0951192X.2017.1407445).
6. Suslov A.G., Fedonin O.N., Medvedev D.M. Designing of functionally oriented technological processes. *Vestnik mashinostroeniya*, 2019, no. 9, pp. 66–71. EDN: [TDBHLR](https://www.edn.net/TDBHLR).

7. Rastegaev E.V. Requirements to TP CAD in conditions of parallel engineering development. *Vestnik of P.A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University*, 2019, no. 4, pp. 69–73. EDN: [KXJQUX](#).
8. Bazrov B.M., Troitsky A.A. Manufacturability of Products. *Russian Engineering Research*, 2020, vol. 40, no. 8, pp. 683–687. DOI: [10.3103/S1068798X20080055](#).
9. Vartanov M., Chushenkov I. Methodology for evaluating the manufacturability of engineering products. *Stankoinstrument*, 2019, no. 2, pp. 14–23. DOI: [10.22184/2499-9407.2019.15.02.14.22](#).
10. Tchigirinsky Yu.L. Mathematical methods in technological design. *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2018, no. 4, pp. 13–20. EDN: [RRLRLZ](#).
11. Li X., Zhang S., Huang B., Huang R., Xu C., Zhang Y. A survey of knowledge representation methods and applications in machining process planning. *International journal of advanced manufacturing technology*, 2018, vol. 98, no. 9–12, pp. 3041–3059. DOI: [10.1007/s00170-018-2433-8](#).
12. Nazaryev A.V., Bochkarev P.Yu., Bokova L.G. Complex approach to implementation of technological preparation of multiproduct machining productions by taking into account specifics of assembly of high-precision products. *Handbook. An Engineering Journal*, 2019, no. 3, pp. 35–42. DOI: [10.14489/hb.2019.03.pp.035-042](#).
13. 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, pp. 48–56. DOI: [10.18323/2073-5073-2021-3-48-56](#).
14. Nazarev A.V., Bochkaryov P.Yu. Formalization of requirements to precision products at technological preparation stages of machine-assembly production. *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2020, no. 12, pp. 39–45. DOI: [10.30987/2223-4608-2020-12-39-45](#).
15. Agafonova E.N., Zakharov O.V. Classification of machine parts from position measurements. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*, 2018, no. 2, pp. 12–16. EDN: [UPLJAY](#).
16. Gaer M.A., Shabalin A.V. Geometrical divisibility of parts in analysis of assemblies with spatial tolerances. *Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2008, no. 2, pp. 355–361. EDN: [LHTCCX](#).
17. Gaer M.A., Kuzmina E.Yu. Configuration varieties of square forms of surfaces details and assemblies. *Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2019, no. 2, pp. 49–66. DOI: [10.26731/1813-9108.2019.2\(62\).59-66](#).
18. Lelyukhin V.E., Kolesnikova O.V. Analysis and calculation of dimensional chains based on dimensional bond graphs. *The Far Eastern Federal University: School of Engineering Bulletin*, 2015, no. 4, pp. 29–34. EDN: [VAXTID](#).
19. Grechnikov F.V., Tlustenko S.F. Design build process for the accuracy of eligibility. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2011, no. 3–4, pp. 38–43. EDN: [OWYQOT](#).
20. Chakraborty S., Chowdhury R. Graph-theoretic-approach-assisted Gaussian process for nonlinear stochastic dynamic analysis under generalized loading. *Journal of Engineering Mechanics*, 2019, vol. 145, no. 12, article number 04019105. DOI: [10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001685](#).

The development of methodological and mathematical tools for implementing the strategy of identifying critical requirements for assembling highly-precise goods

© 2022

Aleksandr V. Nazaryev^{*1,4}, PhD (Engineering), 1st category design engineer

Petr Yu. Bochkarev^{2,3,5}, Doctor of Sciences (Engineering), Professor

¹Branch of the FSUE “Academician Pilyugin Scientific-Production Center of Automatics and Instrument-Building” – “Industrial Association “Korpus”, Saratov (Russia)

²Kamyshin Technological Institute (branch) of Volgograd State Technical University, Kamyshin (Russia)

³N.I. Vavilov Saratov State Agrarian University, Saratov (Russia)

*E-mail: alex121989@mail.ru

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0610-6060>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0587-6338>

Received 06.06.2022

Accepted 27.08.2022

Abstract: The problem of improving the production of highly-precise devices and machines has primary importance. It is caused by the fact that the quality and accuracy of production of such devices impose increasingly stringent requirements, while standard approaches intended to ensure these criteria are insufficiently multipurpose. The developed approach – a complex of formalized design procedures for systems for accounting the requirements for the assembly of highly-precise goods when designing technological processes of mechanical treatment – allows solving these problems. However, it is necessary to develop additional solutions to ensure the relationship between the design and technological preproduction. The relevance of the study is in the solution of an important problem – the improvement of the procedure for carrying out the design-dimensional analysis within the system for accounting the requirements for the assembly of highly-precise products when designing technological processes of mechanical treatment. To solve this issue, the authors proposed the technique of component separation of a highly-precise good based on the identification of a base component / assembly unit and specified a mathematical model for the formation of a conjugation graph and a dimension graph,

which is necessary to identify critical (vital) requirements to assembly and carrying out the design-dimensional analysis. Introducing the proposed techniques will allow choosing rational technologies for producing parts at further stages of implementation of design procedures of the system for accounting the requirements for the assembly of highly-precise goods when designing technological processes of mechanical treatment. In turn, it will cause labor intensity reduction and cutting the time of production of highly-precise goods and will allow decreasing costs during design-technological preparation within the conditions of multiproduct manufacture.

Keywords: design-engineering preproduction; highly precise product; assembly; engineering dimensional analysis; base component; base assembly unit.

For citation: Nazaryev A.V., Bochkarev P.Yu. The development of methodological and mathematical tools for implementing the strategy of identifying critical requirements for assembling highly-precise goods. *Frontier Materials & Technologies*, 2022, no. 4, pp. 70–80. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-4-70-80.