

УДК 621.9

DOI:10.30987/2223-4608-2020-12-39-45

**А.В. Назарьев**, инженер-конструктор  
(Филиал НПЦ автоматики и приборостроения имени академика Н.А. Пилюгина – ПО «Корпус», 410019, г. Саратов, ул. Осипова, 1),

**П.Ю. Бочкарев**, д.т.н.  
(Волгоградский государственный технический университет 400005, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, 28)

E-mail: alex121989@mail.ru

## **Формализация требований к высокоточным изделиям на этапах технологической подготовки механосборочных производств**

*Рассмотрено совершенствование математического и методического обеспечения реализации укрупненного блока проектных процедур анализа требований к сборке высокоточных изделий, являющегося частью комплексного подхода. Показано, что это обеспечивает эффективное выполнение сборочных операций на основе связи между технологической подготовкой обрабатывающего и сборочного производств высокоточных изделий.*

**Ключевые слова:** высокоточное изделие; требование к сборке; комплекс проектных процедур; технологическая подготовка производства; конструкторский размерный анализ; структурный элемент.

**A.V. Nazariyev**, Design engineer  
(Branch of SPC of Academician Pilyugin Automation and Instrument Engineering – PA “Korpus”, 1, Osipov Str., Saratov, 410019)

**P.Yu. Bochkaryov**, Dr. Sc. Tech.  
(Volgograd State Technical University, 28, Lenin Avenue, Volgograd, 400005)

## **Formalization of requirements to precision products at technological preparation stages of machine-assembly production**

*The improvement of mathematical and methodical support to realize an enlarged unit of design procedures of the analysis of requirements to the assembly of precision products being a part of a complex approach is considered. It is shown that this ensures the efficient fulfillment of assembly operations on the basis of the tie between a technological preparation of processing and assembly production of precision products.*

**Keywords:** precision product; requirement to assembly; complex of design procedures; technological pre-production; design dimensional analysis; structural element.

Снижение себестоимости и времени изготовления единицы готовой продукции при сохранении требуемого качества в современных экономических условиях является основным фактором успеха любого машиностроительного производства. Особенно это касается сборки высокоточных приборов и машин, к числу которых относится большинство изделий ракетно-космической и авиационной промышленности, прецизионное станкостроение и прочее, т.к. данный этап производственного цикла является завершающим и наиболее

ответственным [1].

Понятие «высокоточные изделия» следует применять с учётом конкретной производственной ситуации, если при сборке для значительной части узлов изделий не обеспечивается допуск замыкающего звена. При этом необходимо изготавливать дополнительные сборочные комплекты, что увеличивает объём незавершённого производства.

Применение традиционных подходов для решения данной проблемы влечет за собой увеличение трудоемкости и себестоимости

сборки. Кроме того, не всегда эти методы можно реализовать в высокоточных сборочных единицах изделий. Также следует отметить, что данные подходы не учитывают связь между проектированием технологических процессов изготовления деталей, входящих в сборочную единицу, и требованиями, предъявляемыми к технологии и точности сборки высокоточной сборочной единицы. Именно поэтому целесообразно разрабатывать подходы, позволяющие комплексно решать поставленные перед производством задачи.

Для решения данной проблемы был предложен комплексный подход – комплекс формализованных проектных процедур системы

учета требований к сборке высокоточных изделий при проектировании технологических процессов механической обработки (СТСТПМ) (рис. 1, блок I) [2]. Предложенный подход позволяет выбирать в рамках системы автоматизированного планирования технологических процессов (САПЛТП) [3] рациональные технологические процессы изготовления деталей. Это обеспечивает уменьшение времени и трудоемкости сборки высокоточных изделий, снижение времени при технологической подготовке производства, а также повышение качества и надежности выпускаемой продукции.

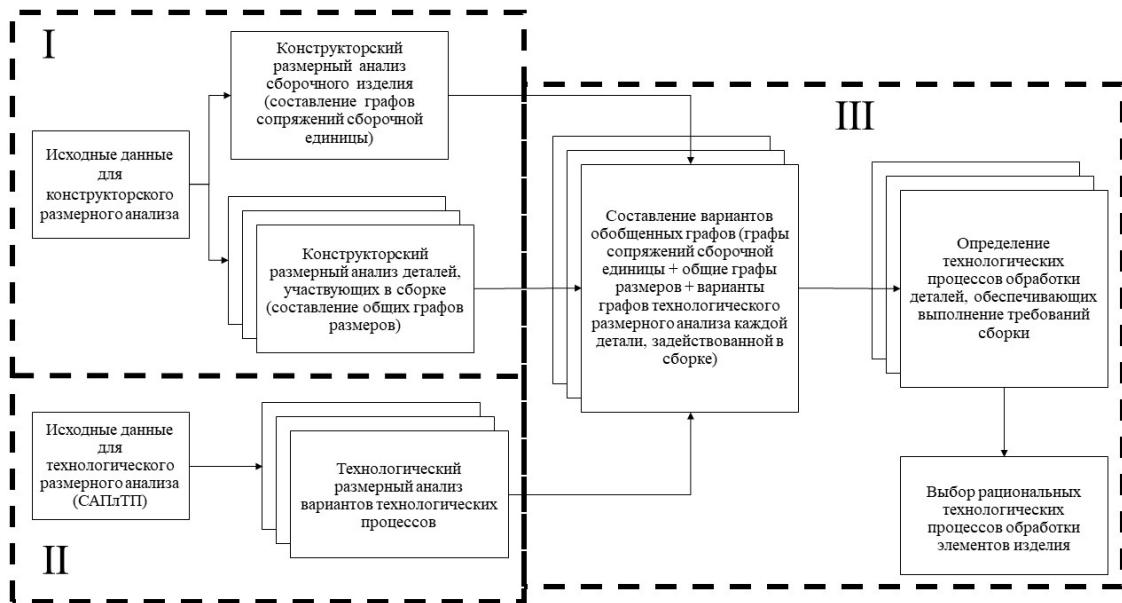


Рис. 1. Структура СТСТПМ в общем виде

Данный комплексный подход основывается на связи между технологической подготовкой механообрабатывающего и механосборочного производств, с учетом ограничений, накладываемых требованиями сборки, и реально складывающейся производственной ситуацией. В общем виде эта связь представлена на рис. 2.

Однако для обеспечения связи между конструкторской и технологической подготовкой производства, переходу к оценке производственной технологичности деталей в условиях многономенклатурного производства и более глубокой интеграции СТСТПМ в структуру САПЛТП необходим поиск путей модернизации существующих математического, методического и алгоритмического аппаратов разработанной системы. Особенно это касается укрупненного блока проектных процедур анализа требований к сборке высокоточных изделий, так как данный этап непосредственно связан с конструкторской подготовкой произ-

водства, а исходная информация, полученная в ходе реализации блока процедур анализа, непосредственно влияет на качество принятия решения по выбору рациональных технологий изготовления деталей.

Целью исследования является совершенствование методического и математического обеспечения укрупненного блока проектных процедур анализа требований к сборке высокоточных изделий СТСТПМ для эффективного выполнения конструкторского размерного анализа (КРА) высокоточной сборочной единицы в автоматизированном режиме и выбора рациональных технологических процессов изготовления деталей при проведении технологической подготовки производства многономенклатурных машиностроительных комплексов.

В процессе реализации данного укрупненного блока необходимо выявить все выходные геометрические параметры высокоточного изделия – замыкающие звенья (требования к

сборке), из них выбрать те, допуск которых более жесткий, по сравнению с точностью

размеров комплектующих деталей, т.е. составляющих звеньев.



Рис. 2. Связь между технологической подготовкой механообрабатывающего и сборочного производств

Выявление подобных требований, которые не могут быть обеспечены методом полной взаимозаменяемости, позволит сформировать комплект деталей, размеры которых являются составляющими звеньями размерных цепей для обеспечения данных требований. Это позволит с учетом складывающейся производственной ситуации разработать рациональные технологии их изготовления, обеспечивающие сокращение количества некомплектных деталей (незавершенное производство) и, как следствие, снизить трудоемкость и временные затраты последующей сборки.

Для автоматизации данного укрупненного блока выполняется анализ 3D моделей высокоточных изделий и их элементов, содержащих в себе сведения о размерах, допусках, отклонениях формы, расположения элементарных поверхностей деталей и размерно-точностные характеристики сборочных единиц. Создается математическое и методическое обеспечение, формализующее процедуры анализа требований к сборочной единице и определения тех из них, которые не могут быть выдержаны, с учетом технологических возможностей производственной системы, методом полной взаимозаменяемости.

Конструкторский размерный анализ заключается в построении графов размерного анализа сборочных единиц (графов сопряжений)  $G_C = (B_C, C_C)$  и графов размерного анализа деталей, входящих в данные сборочные единицы (графов размеров)  $G_P^j = (B_P, C_P)$  ( $j_1 = 1 \dots n$  обозначает номер детали в сборке). Для реализации предложенного укрупненного блока были выбраны и доработаны математические моде-

ли – прототипы [2, 4, 5].

Процедура анализа высокоточного изделия и требований к его сборке включает в себя следующие этапы:

1. Разбиение высокоточного изделия или сборочной единицы на структурные элементы.

2. Определение всех возможных плоскостей для проведения конструкторского размерного анализа.

3. Определение всех возможных выходных геометрических параметров – замыкающих звеньев, а также необходимых для расчета размеров комплектующих деталей – составляющих звеньев, принадлежащих данным плоскостям (проектная процедура генерации).

4. Выявление тех требований к сборке, которые не могут быть обеспечены методом полной взаимозаменяемости (проектная процедура отсева).

Корректное разбиение высокоточного узла, в соответствии с нормативной документацией [6], на структурные элементы с последующим определением всех возможных плоскостей для проведения конструкторского размерного анализа невозможно без учета функционального назначения узла (изделия), сборочных единиц и деталей, входящих в него. Для определения функционального назначения изделия, узла или сборочной единицы необходимо выделить в нем(ней) детали, которые будут определять функциональное назначение изделия, узла или сборочной единицы. Именно к данным деталям и к сопряжениям данных деталей будет предъявляться большая часть требований к сборке (выходных параметров). Назовем такие детали деталями-маркерами,

условно разделим все детали в изделии на две группы: детали для передачи движения и детали, обеспечивающие соединение.

Формирование групп деталей машин по характеру их использования выполнялось на основе материалов, представленных в работе [7].

По результатам выполненного анализа и обобщения материалов научно-исследовательских публикаций сделаны следующие выводы:

- самым широко применяемым типом механических передач являются вращательные;
- в качестве деталей-маркеров целесообразно использовать детали для передачи движения, т.к. они наиболее четко дают представление о функциональном назначении из

делия (узла, сборочной единицы).

Стоит также отметить, что в крупных сборочных единицах или узлах, в состав которых входит несколько сборочных единиц, роль деталей-маркеров могут выполнять данные сборочные единицы в зависимости от их функционального назначения (например, если они выполняют функцию передачи движения в данном узле). На рис. 3 представлены примеры деталей-маркеров отдельных сборочных единиц (узлов). Так, для сборочной единицы «Пакет статора» деталями-маркерами выступают детали «Втулка» и «Ось», а в сборочной единице (узле) «Гироузел» такими маркерами выступают деталь «Корпус» и сборочная единица «Гиромотор».

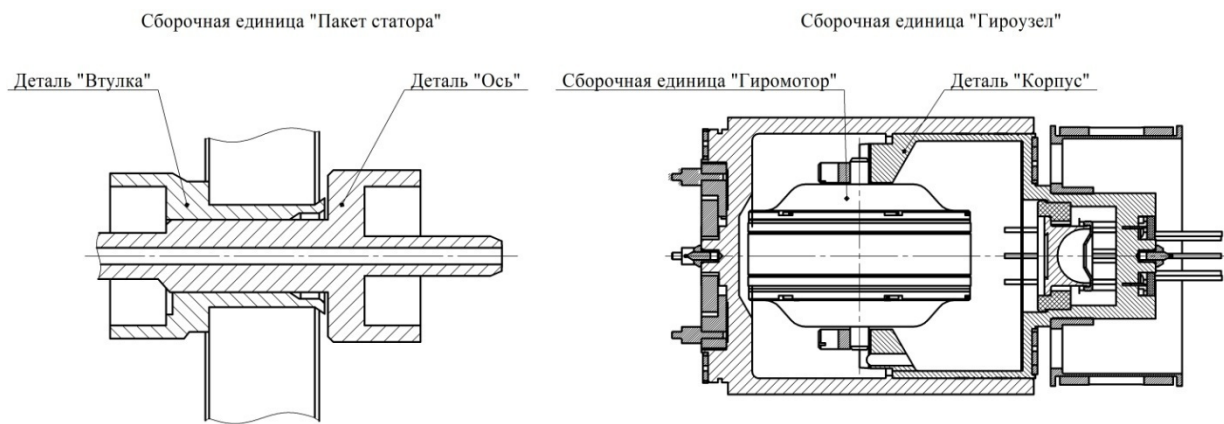


Рис. 3. Примеры деталей-маркеров отдельных сборочных единиц (узлов)

Полученная информация позволяет перейти к следующему этапу проектной процедуры – определение поверхностей рассматриваемых деталей и требований к ним с позиции функциональных задач отдельных деталей и сборочного узла в целом.

При назначении требований к точности деталей учитываются рекомендации, приведенные в источнике [8] и предлагаются следующие методические подходы:

- Поверхности по предъявляемым к ним требованиям классифицируются по четырем группам, причем при переходе к поверхности под большим номером требования к точности снижаются, и допуски могут быть расширены.
- Самые ответственные решения необходимы при назначении допусков, которые определяют технический уровень и работоспособность машины, в состав которой входит проектируемая деталь.
- Высокие требования должны быть предъявлены к поверхностям, от которых зависит работоспособность механизма, в которую входит деталь.
- Требования к поверхностям, определяющим расположение детали в механизме,

должны быть ниже.

- Ужесточение технических требований к прочим поверхностям приводит к увеличению расходов.

На основе вышеизложенного уточним классификацию структурных элементов [2], на которые необходимо разбить изделие или узел для определения необходимых плоскостей КРА.

Структурный элемент – элемент сборочной единицы или сборочная единица в целом с определенным функциональным назначением. По функциональному назначению структурные элементы могут быть условно разделены на три группы (рис. 4).

Разбиение сборочной единицы (высокоточного изделия) на структурные элементы целесообразно начинать с выявления главного вида. Главный вид предмета согласно [9] – основной вид на фронтальной плоскости проекции, который дает наиболее полное представление о форме и размерах предмета, относительно которого располагаются остальные основные виды. Исходя из этого, можно сделать вывод, что большая часть размерных связей будет представлена именно на главном виде.

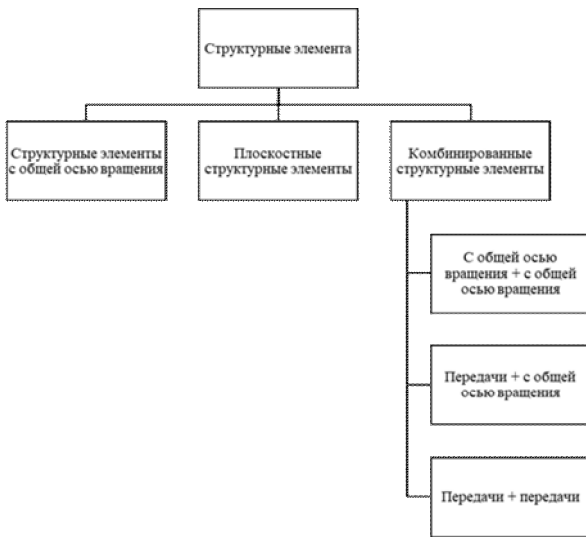


Рис. 4. Классификация структурных элементов по функциональному назначению

Для выявления главного вида сборочных единиц предлагается использовать детали-маркеры, так как именно они дают наиболее полное представление о функциональном назначении изделия, сборочной единицы или узла.

Структурный элемент с общей осью вращения состоит из сопряжений деталей – тел вращения. Основное функциональное назначение подобных элементов – передача вращательного движения. К числу таких сопряжений можно отнести цилиндрические, конические, сферические, винтовые. Для выбора плоскостей КРА необходимо руководствоваться следующими правилами:

- если структурный элемент с общей осью вращения является симметричным или условно симметричным во всех секущих плоскостях, проходящих через ось вращения, то для построения необходимых графов КРА выбирается любая из этих плоскостей;

- если структурный элемент с общей осью вращения является не симметричным, то для построения необходимых графов КРА выбирается секущая плоскость, проходящая через ось вращения структурного элемента и параллельная плоскости главного вида структурного элемента (плоскость, в которую попадает большая часть сопряжений деталей – тел вращения).

В качестве деталей-маркеров для структурных элементов с общей осью вращения в большинстве случаев будут выступать детали, образующие пару «вал – отверстие».

Плоскостной структурный элемент может состоять из деталей различного типа. Основное функциональное назначение подобных элементов – передача прямолинейного или возвратно-поступательного движения, движения по определенной траектории, а также пре-

образование движения. Для построения необходимых графов КРА выбирается плоскость главного вида изделия или параллельная плоскости главного вида (в случае, когда для построения размерной цепи необходим разрез).

В качестве деталей-маркеров для плоскостных структурных элементов в большинстве случаев будут выступать детали-передачи (передачи с гибкой связью, ременные, цепные, передачи зацеплением – зубчатые, планетарные, червячные, фрикционные и т.д.).

Для комбинированных структурных элементов при построении необходимых графов КРА, прежде всего, необходимо определить какие детали (структурные элементы) комбинируются в данном структурном элементе. Рассмотрим следующие варианты:

- 1) детали (структурные элементы) – тела вращения комбинируются с деталями (структурными элементами) – телами вращения;

- 2) детали-передачи (плоскостные структурные элементы) с деталями (структурными элементами) – телами вращения;

- 3) детали-передачи (плоскостные структурные элементы) с деталями-передачами (плоскостными структурными элементами).

Следует учитывать тот факт, что детали в комбинированном структурном элементе сопрягаются под различными углами.

Следующей задачей является необходимость определения точки сопряжения данных деталей. Плоскостью для проведения КРА целесообразно выбирать ту, которая проходит через данную точку сопряжения и одновременно совпадает с плоскостями главных видов деталей, образующих структурный элемент (либо параллельная им).

После определения всех возможных структурных элементов и всех возможных плоскостей для проведения КРА необходимо осуществить анализ полученных плоскостей и исключить дублирующие (при их наличии). Далее определяются все возможные требования к сборке и выявляются те цепи, которые не могут быть обеспечены методом полной взаимозаменяемости.

Существующие методы достижения точности при сборке (точности замыкающего звена) представлены на рис. 5.

Для выявления требований к сборке, не удовлетворяющих методам полной взаимозаменяемости, необходимо сформировать множество требований к сборке сборочной единицы (изделия)  $M_{T.C.}$ . Полученные требования сборки необходимо распределить на пять подмножеств, соответствующих методам достижения точности (см. рис. 5).

$$M_{T.C.} = \{M_{П.В.}, M_{Н.В.}, M_{Г.В.}, M_{И.П.}, M_{PE}\} \quad (1)$$

где  $M_{П.В.}$  – подмножество требований к сборке, обеспечиваемое методом полной взаимозаменяемости;  $M_{Н.В.}$  – 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.

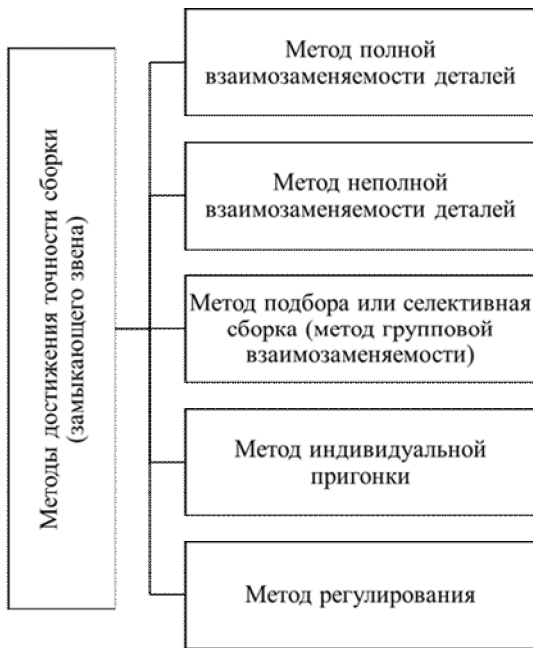


Рис. 5. Методы достижения точности при сборке

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{k,l}^{i,j} = \sum_{i=1}^{n_7} \overrightarrow{A_{k_1,m}^{i_1,j}} - \sum_{i=n_7-1}^{n_7-n_8} \overleftarrow{A_{k_1,m}^{i_1,j}} \\ TB_{k,l}^{i,j} = \sum_{i=1}^{n_9} TA_{k_1,m}^{i_1,j} \end{array} \right. ; \left\{ \begin{array}{l} A_{k_1,m}^{i_1,j} = \sum_{i=1}^{n_{10}} \overrightarrow{A_{k_1,m}^{i_1,j}} - \sum_{i=n_{10}-1}^{n_{10}-n_{11}} \overleftarrow{A_{k_1,m}^{i_1,j}} \\ TA_{k_1,m}^{i_1,j} = \sum_{i=1}^{n_{12}} TA_{k_1,m}^{i_1,j} \end{array} \right. \quad (2)$$

где знаками  $\rightarrow, \leftarrow$  соответственно обозначены увеличивающие и уменьшающие составляющие звенья размерной цепи;  $n_7$  и  $n_{10}$  — число увеличивающих звеньев при расчете требований сборки и составляющих звеньев соответственно;  $n_8$  и  $n_{11}$  — число уменьшающих звеньев при расчете требований сборки и составляющих звеньев соответственно;  $T$  – допуск на соответствующий размер.

Требования сборки, которые полностью соответствуют условию:

$$TB_{k_1,l}^{i,j} = \sum_{i=1}^{n_9} TA_{k_1,m}^{i_1,j} \quad (3)$$

обеспечиваются методом полной взаимозаменяемости и в дальнейшем учитываться не будут.

В поставленной авторами задаче рассматриваются те требования, которые отвечают

Для корректного расчета замыкающих и составляющих звеньев требований к сборке, входящих в данное множество, необходимо ввести определенную индексацию размеров, допусков форм и расположения:

$B_{k,l}^{i,j}$  – где  $B$  – требования к сборке (замыкающие звенья);  $i$  – порядковый номер требования ( $i = 1 \dots n_1$ );  $j$  – номер плоскости, к которой принадлежит данное требование ( $j = 1 \dots n_2$ );  $k$  – порядковый номер изделия ( $k = 1 \dots n_3$ );  $l$  – порядковый номер сборочной единицы или структурного элемента ( $l = 0 \dots n_4$ ). Если в качестве сборочной единицы или структурного элемента выступает само изделие, то  $l = 0$ , для сборочных единиц или структурных элементов, входящих в данное изделие применяется  $l = 1 \dots n_4$ .

$A_{k_1,m}^{i_1,j}$  – где  $A$  – составляющие звенья конструкторской размерной цепи; индекс  $i_1$  – порядковый номер составляющего звена ( $i_1 = 1 \dots n_5$ ); индекс  $k_1$  – номер детали ( $k_1 = 1 \dots n_6$ );  $m$  – порядковый номер размера в детали ( $m = 1 \dots n_6$ ).

Тогда формулы для расчета требований к сборке с учетом предложенной индексации в общем виде будут выглядеть следующим образом:

следующему условию:

$$TB_{k_1,l}^{i,j} < \sum_{i=1}^{n_9} TA_{k_1,m}^{i_1,j} \quad (4)$$

т.е. такие требования, которые не могут быть обеспечены методом полной взаимозаменяемости.

На рис. 6 представлен структурный элемент, совпадающий по составу со сборочной единицей «Пакет статора», а также расчет одного из требований к сборке данной сборочной единицы, которое не может быть обеспечено методом полной взаимозаменяемости (при расчете учитывается предложенная индексация).

Для распределения элементов множества требований сборки  $M_{Т.С.}$  на пять групп предлагается система критериев: объем выпуска

изделий (тип производства); характер распределения размеров; количество звеньев размерной цепи; точность замыкающего звена; характер компенсирующего звена.

Расчет положения фаски детали "Ось" в сборочной единице (структурном элементе) "Пакет статора"

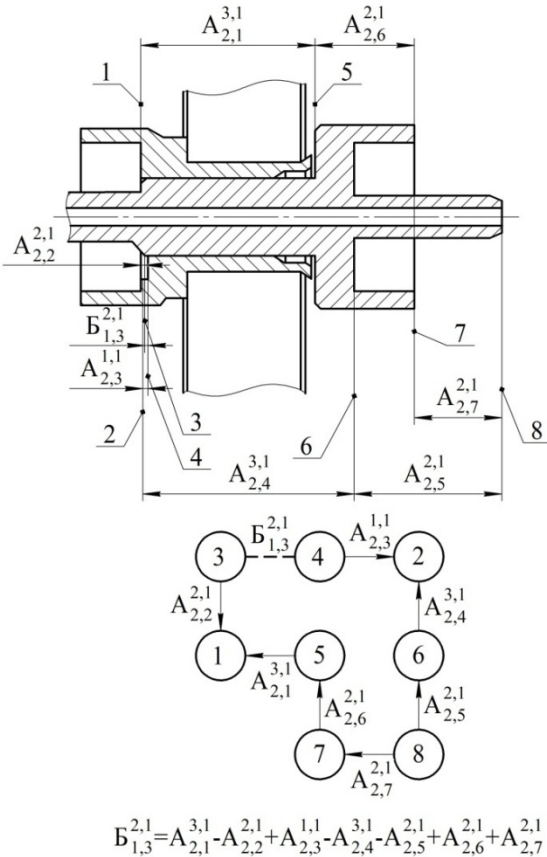


Рис. 6. Структурный элемент, совпадающий по составу со сборочной единицей, и расчет одного из требований к сборке

### Выводы

Совершенствование укрупненного блока проектных процедур анализа требований к сборке высокоточных изделий СТСТПМ позволит эффективнее выполнять КРА высокоточной сборочной единицы в автоматизированном режиме и в дальнейшем выбирать в САПЛТП рациональные технологические процессы изготовления деталей при проведении технологической подготовки производства для многономенклатурных машиностроительных комплексов.

Модернизация данного этапа позволяет установить связь между конструкторской и технологической подготовкой производства.

В дальнейшем планируется формализация и параметризация каждого из выбранных критериев, а также уточнение процедуры распределения требований к сборке по группам.

Развитие научных и прикладных работ в

данном направлении позволяет обеспечить дальнейшее расширение цифровизации конструкторской и технологической подготовки производства и переход к интеллектуальным производственным системам.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суслов, А.Г., Дальский, А.М. Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
2. Назарьев, А.В., Бочкарев, П.Ю., Бокова, Л.Г. Комплексный подход для выполнения технологической подготовки многономенклатурных механообрабатывающих производств на основе учета особенностей сборки высокоточных изделий // Справочник. Инженерный журнал с приложением. - 2019. - № 3 (264). - С. 35-42.
3. Бочкарев, П.Ю. Системное представление планирования технологических процессов механообработки // Технология машиностроения. - 2002. - №1. - С. 10-14.
4. Лелюхин, В.Е., Колесникова, О.В. Анализ и расчет размерных цепей на основе графов размерных связей // Вестник ИШ ДВФУ. - 2015. - №4 (25). - С. 29-34.
5. 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.
6. ГОСТ 2.101-2016. Единая система конструкторской документации. Виды изделий. - М.: Стандартинформ, 2018. — 12 с.
7. Анурьев, В.И., Жесткова, И.Н. Справочник конструктора-машиностроителя : в 3 т. - М. : Машиностроение, 2001.
8. Базров, Б.М. Основы технологии машиностроения: учебник - М. : Машиностроение, 2005. - 736 с.
9. ГОСТ 2.305-2008. Единая система конструкторской документации. Изображения - виды, разрезы, сечения. — М.: Стандартинформ, 2009. — 27 с.

### REFERENCES

1. Suslov, A.G., Dalsky, A.M. *Scientific Fundamentals of Engineering Technique*. – M.: Mechanical Engineering, 2002. – pp. 684.
2. Nazaryev, A.V., Bochkaryov, P.Yu., Bokova, L.G. Complex approach to fulfillment of technological preparation of multi-range machining-processing production based on taking into account peculiarities of precision product assemblage // *Reference Book. Engineering Journal with Appendix*. – 2019. – No.3(264). – pp. 35-42.
3. Bochkaryov, P.Yu. System presentation of planning for engineering processes of machining // *Engineering Technique*. – 2002. – No.1. – pp. 10-14.
4. Lelyukhin, V.E., Kolesnikova, O.V. Analysis and Calculation of Dimensional Chains Based on Dimensional Tie Graphs // *Bulletin of ISh DVFU*. – 2015. – No.4(25). – pp. 29-34.
5. Grechnikov, F.V., Tlustenko, S.F. Design of assemblage technological process on criteria of precision // *Bulletin of Academician Korolyov State Aerospace University of Samara*. – 2011. – No.3-4. – pp. 38-43.
6. GOST 2.101-2016. *Single System of Design Documentation. Product Kinds*. – M.: StandardInform, 2018. – pp. 12.
7. Anuriev, V.I., Zhestkova, I.N. *Designer-Mechanician's Reference Book*: in 3 Vol. – M.: Mechanical Engineering, 2001.
8. Bazrov, B.M. *Fundamentals of Engineering Technique*: textbook – M.: Mechanical Engineering, 2005. – pp. 736.
9. GOST 2.305-2008. *Single System of Design Documentation. Images – Kinds, Sections, Profiles*. – M.: Standardinform, 2009. – pp. 27.

Рецензент д.т.н. А.П. Ласковнев