

УДК 621.9

DOI: 10.12737/43485

**А.В. Назарьев**, аспирант,

**П.Ю. Бочкарев**, д.т.н.

(ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина»,  
410054, Саратов, ул. Политехническая, 77)

E-mail: alex121989@mail.ru, bpy@sstu.ru

## **Обеспечение эффективного выполнения сборочных операций высокоточных изделий машиностроения и приборостроения**

*Представлена организация комплексного подхода (комплекса проектных процедур), обеспечивающего эффективное выполнение сборочных операций на основе связи между технологической подготовкой обрабатываемого и сборочного производств высокоточных изделий. Приведен обзор возможных алгоритмов ее реализации.*

**Ключевые слова:** сборочное производство; комплекс проектных процедур технологической подготовки производства; высокоточные изделия; конфигурационное пространство.

**A.V. Nazariyev**, Post graduate student,

**P.Yu. Bochkaryov**, D. Eng.

(FSBEI HE "Gagarin State Technical University of Saratov", 77, Polytekhnicheskaya Str, Saratov, 410054)

## **Assurance of efficient assembly operations carrying out of products of mechanical engineering and instrument making**

*This paper reports the structure and the analysis of possible solutions for the realization of design procedures complex ensuring the efficient fulfillment of assembly operations on the basis of a tie between the technological preparation of production (TPP) for manufacturing activity and assemblage of high-precision products taking into account requirements taken at designing products. The realization of this approach in SADL-TP is urgent as the complex of design procedures will allow taking into account a real production situation and choosing efficient technological processes for parts machining taking into account assemblage requirements. That, in its turn, will allow decreasing labor-intensiveness, production time and cost price and increasing quality and accuracy of high-precision products, and also reducing time and labor-intensiveness at TPP.*

**Keywords:** assembly production; complex of design procedures at technological preparation of production; high-precision products; configuration space.

Современный машиностроительный и приборостроительный комплексы – это чрезвычайно сложные системы со своими законами развития. Проблема совершенствования современного машиностроения и приборостроения имеет первостепенное значение, т.к. их развитие происходило стихийно, что в итоге сделало их расточительными в расходе материальных, энергетических и трудовых ресурсов, отрицательно влияющим на состояние окружающей среды и т.п.

Особенно ярко это проявилось при изготовлении высокоточных узлов, применяемых в изделиях для авиационно-космической промышленности, прецизионного станкостроения, двигателестроения и т.д., так как данные

отрасли характеризуются жесткими, постоянно возрастающими требованиями к качеству изготовления машин.

Обеспечение данных требований существующими методами связано в основном с серьезными проблемами, решение которых достигается в большинстве случаев затратными способами в виде многочисленных переборок, доработок и уточнения конструкции, поскольку эти требования в серийном производстве находятся на грани максимально технологически достижимых.

Кроме того, значительные трудности, особенно на этапе сборочного производства, вызывает влияние непознанных и неуправляемых причин, приводящих к непрогнозируе-

мому разбросу заданных эксплуатационных характеристик [1–3].

На рис. 1 представлены методы достижения точности при сборке изделий (методы достижения точности замыкающего звена).

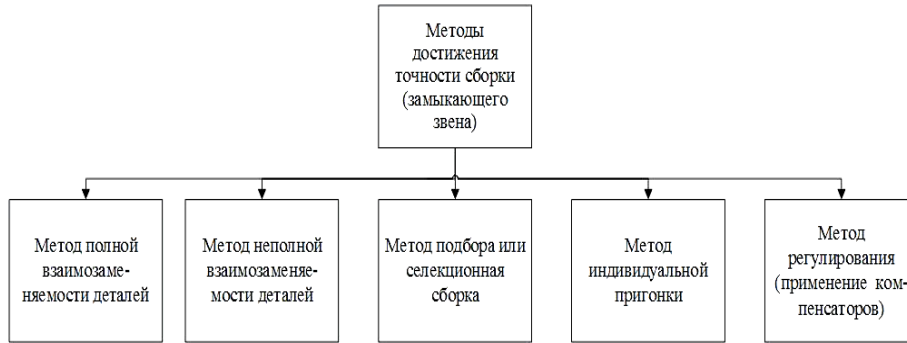


Рис. 1. Методы достижения точности замыкающего звена

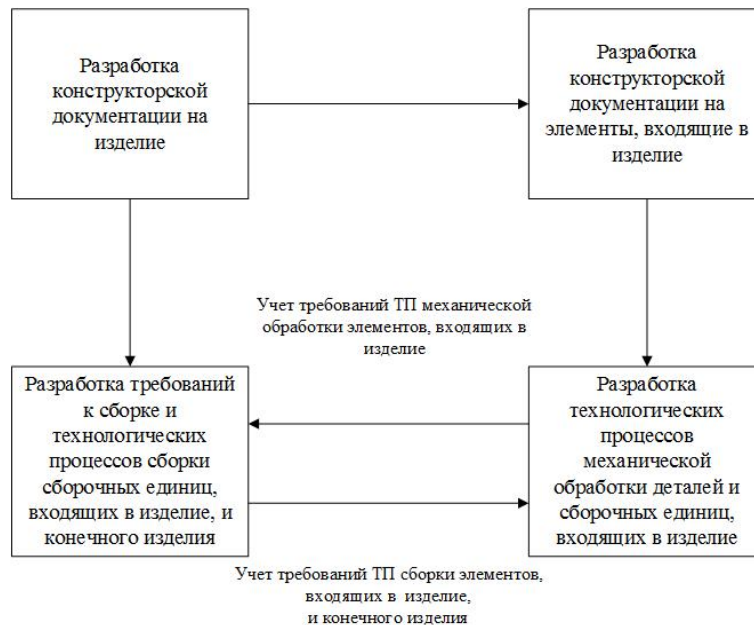


Рис. 2. Связь между технологической подготовкой механообрабатывающего и сборочного производств, с учетом требований, заложенных при проектировании изделия

Представленные методы достижения точности сборки не являются универсальными и зависят от типа производства и конструктивных особенностей изготавливаемых изделий. Кроме того, при сборке высокоточных изделий, в основном, не предусматривается возможность использования методов селективной сборки, индивидуальной пригонки и регулирования, а применяются производственные приемы достижения точности, связанные с доводочными работами, что негативно сказывается на длительности и стоимости сборочного цикла.

Именно поэтому необходимо проведение исследований по созданию комплексного подхода к решению существующих задач в машиностроении, особенно сборки высокоточных изделий, т.к. основными особенностями эффективного функционирования машино-

строительных предприятий являются сжатые сроки и высокое качество технологической подготовки производства (ТПП) [2 – 3].

На сегодняшний день наблюдаются разрозненные решения отдельных задач этой проблемы, таких как повышение качества и точности собираемых изделий, снижение затрат на материалы, внедрение ресурсосберегающих технологий и т.п. Отсутствует отвечающая реальным требованиям концепция системы в целом [1].

Предлагается подход (комплекс проектных процедур), который основывается на установлении связи между технологической подготовкой обрабатывающего и сборочного производств, с учетом требований, заложенных при проектировании изделия.

В общем виде связь представлена на рис. 2. Данный подход позволит в зависимости от

складывающейся производственной ситуации выбирать оптимальные технологические процессы обработки элементов, учитывающих требования последующей сборки. Что, в свою очередь, позволит снизить трудоемкость, время изготовления и себестоимость, повысить качество и точность высокоточных изделий, сократить время и трудоемкость при ТПП.

Структура комплекса проектных процедур включает в себя анализ требований к сборке высокоточных изделий и возможных технологических процессов обработки деталей, входящих в высокоточные изделия (далее технологических процессов) и выбор на основе анализа рациональных технологических процессов. Структура комплекса приведена на рис. 3.

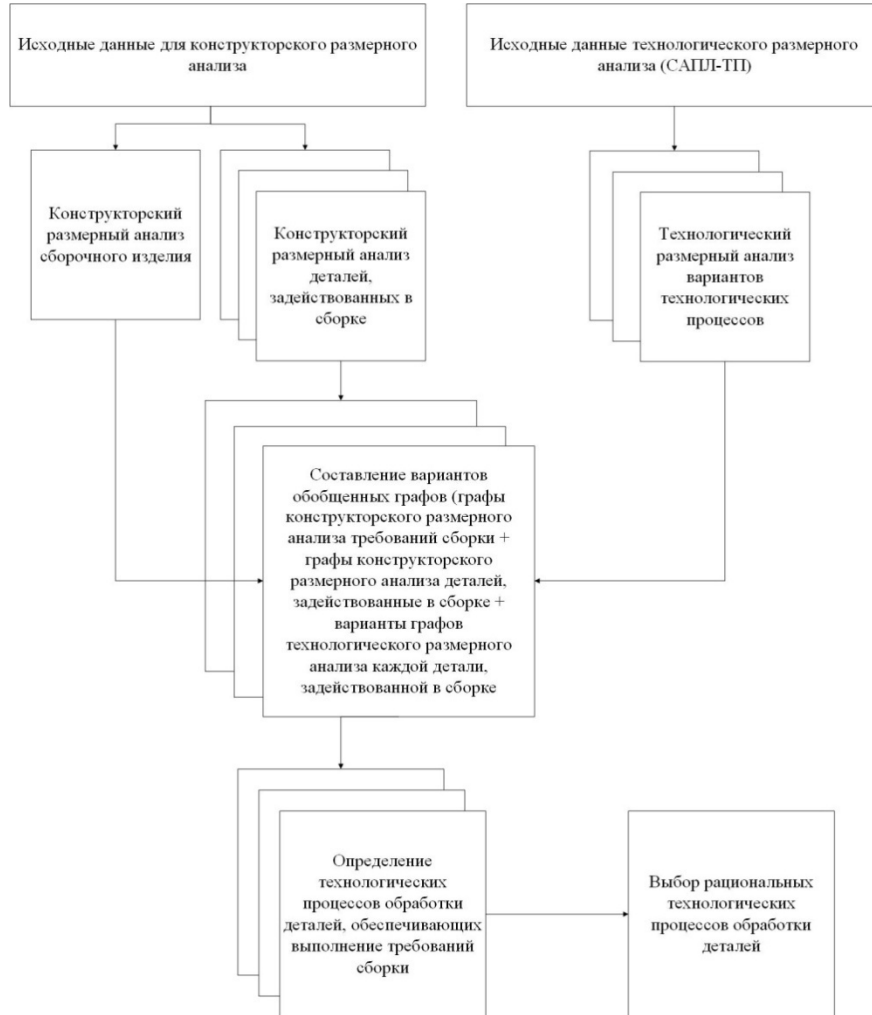


Рис. 3. Структура комплекса проектных процедур

Анализ исходных данных и разработка рациональных технологических процессов в системе автоматизированного планирования технологических процессов (САПЛ-ТП)[4–5] включает в себя несколько этапов.

На начальных этапах проводится конструкторский размерный анализ сборочного изделия и деталей, задействованных в сборке, и технологический размерный анализ множества возможных вариантов технологических процессов, разработанных в САПЛ-ТП. Исходными данными для проведения конструкторского размерного анализа являются конструкторская документация на сборочное изделие и детали, задействованные в сборке, и,

полученные на основе обработки конструкторской документации, базы данных.

В отечественном производстве сложилась тенденция к заданию допусков на двухмерных чертежах отдельных деталей, получаемых из 3D моделей САД-систем, т.к. в геометрических моделях современных систем автоматизированного проектирования (САПР) используется только номинальная геометрия, а допуски носят характер аннотаций [6]. Данная концепция является препятствием на пути автоматизации ТПП, т.к. файлы 3D моделей сборок не содержат данных о допусках и размерных взаимосвязях в сопряжениях деталей сборок, что сказывается на сроках ТПП и

качестве конечного продукта.

Для автоматизации данного этапа может быть применена математическая модель представления и анализа деталей и сборок (в том числе и высокоточных) с использованием понятия конфигурационного пространства.

Конфигурационное пространство – это некоторое абстрактное пространство, представляющее собой совокупность  $m$  переменных, задающих расположение в пространстве некоторой (механической) системы и её частей как относительно друг друга, так и относительно известной системы отсчёта.

Каждая совокупность этих переменных рассматривается как  $m$  декартовых координат в  $m$ -мерном пространстве, называемых обобщенными координатами, которые определяют в каждый момент времени конфигурацию данной системы, т.е. положение самой системы и взаимное расположение ее частей по отношению к данной системе отсчета.

Применительно к сборке изделия понятие допусков расширяется и делится на три группы: допуски расположения, допуски искажения метрики и допуски изгибания. Конфигурационное пространство всей сборки можно представить в виде прямых произведений конфигурационных пространств допусков, поверхностей, деталей и узлов [6].

Алгоритм с применением теории конфигурационных пространств для размерного анализа сборок с допусками рассмотрим на примере детали «Прокладка», входящей в высокоточное изделие «Гиромотор» (рис. 4).

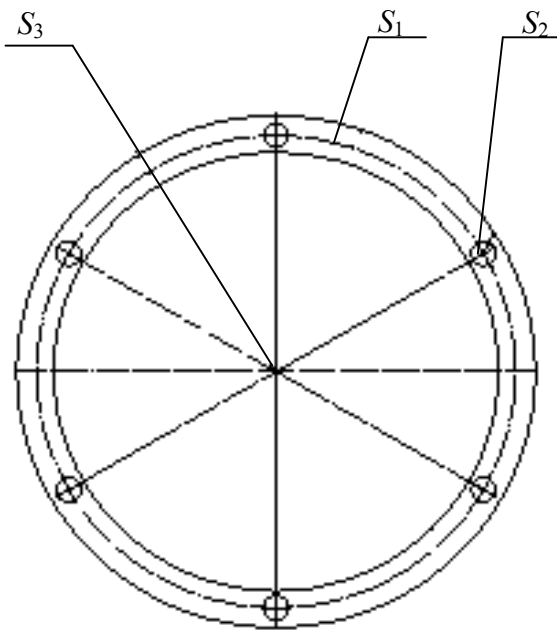


Рис. 4. Деталь «Прокладка»

Пусть на поверхности детали заданы допуски  $DS_1, OS_1, DS_2, DS_3$ . Для реализации алгоритма размерного анализа конфигурационного пространства сборки (в данном случае «сборка» представляется одной деталью) описывается в виде структуры данных, представляющих собой массив вида:

$$\left\| \begin{array}{l} K(D^1S_1; O^1S_1), D^1S_2, D^1S_3 \\ K(D^1S_1; O^1S_1), D^1S_2, D^2S_3 \\ \dots\dots\dots \end{array} \right\|.$$

Каждая запись вида  $\{K(D^1S_1; O^1S_1), D^1S_2, D^1S_3\}$  представляет собой точку конфигурационного подпространства сборки (т.е. один вариант сочетаний всех крайних значений отклонений, назначенных на данную сборку (узел)). Точка конфигурационного пространства, в свою очередь, состоит из конфигурационных пространств поверхностей:

$$\left\{ \frac{K(D^1S_1; O^1S_1)}{КПнов-му1} \right\} \left\{ \frac{D^1S_2}{КПнов-му2} \right\} \left\{ \frac{D^1S_{31}}{КПнов-му3} \right\}$$

Индекс  $K$  обозначает комбинирование нескольких допусков, назначенных на одну поверхность. Число вариантов всех сочетаний вычисляется по формуле

$$N = \prod_{i=2}^k C_i,$$

где  $C_i$  – количество точек конфигурационного пространства  $i$ -й поверхности.

Таким образом, данный алгоритм может быть применен для задания не только номинальных значений размеров сборки (детали), но и всех необходимых допусков и пространственных отклонений.

На основе исходных данных проводится конструкторский размерный анализ сборочного изделия и деталей, участвующих в сборке. В ходе него определяются критические требования сборки и детали, входящих в эти требования.

На рис. 5 показаны высокоточное изделие «Гиромотор» и расчет отдельных критических требований к его сборке (А, Б и У – конструкторские размеры деталей, участвующие в расчете каждого из требований). На рис. 6 рассмотрены детали, размеры которых задействованы при расчете критического требования к сборке «Выступление втулки пакета статора над осью» (А – конструкторские размеры деталей, задействованных в требовании).

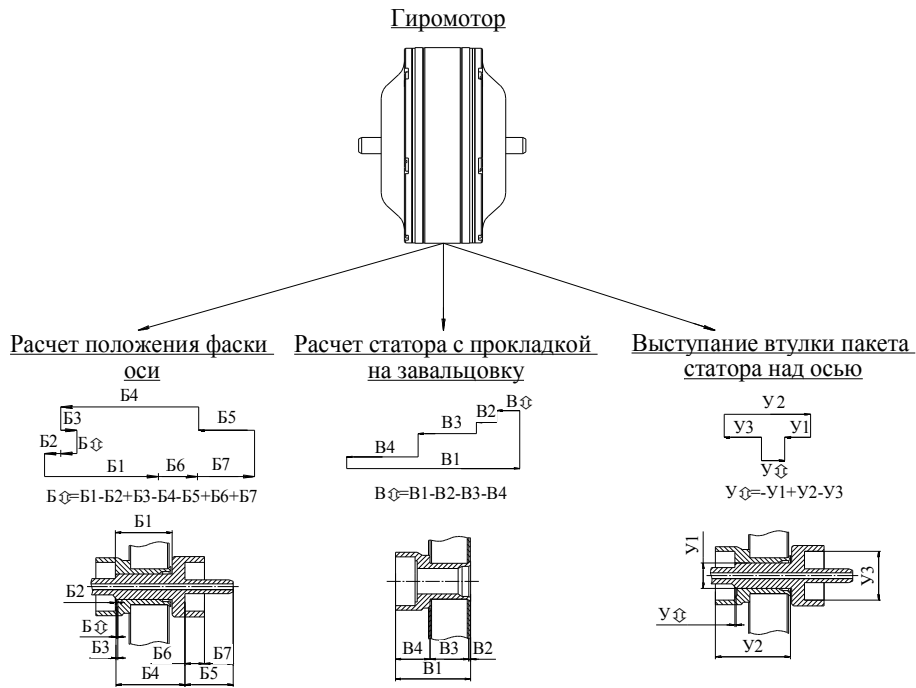


Рис. 5. Высокоточное изделие «Гиромотор» и расчет отдельных требований к его сборке

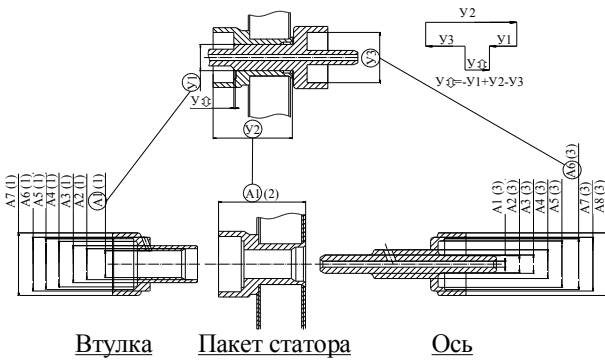


Рис. 6. Расчет требования «Выступление втулки пакета статора над осью»

Размерные связи машиностроительных деталей (сборочных изделий) представляются графом, вершины которого обозначают элементарные поверхности, а ребра – размерные связи между ними.

В результате конструкторского размерного анализа получают общий граф конструкторского размерного анализа сборки и графы конструкторского размерного анализа деталей.

Проектирование технологических процессов в настоящее время невозможно без участия технологов, что приводит к субъективному подходу при принятии решений на стадии ТПП и, как следствие, снижению показателей эффективности работы производственных систем при реализации технологических процессов.

Кроме того, разработка технологических процессов неавтоматизированными методами в условиях многономенклатурного производства позволяет анализировать ограниченное число вариантов на отдельных этапах проектирования, что приводит к потере качества технологических решений и увеличению сроков ТПП.

Одним из подходов, позволяющих автоматизировать ТПП, является САПЛ-ТП, обеспечивающая параллельное проектирование технологических процессов для заданной группы деталей в рассматриваемый период времени с учетом реально складывающейся производственной ситуации [4–5].

Исходными данными для технологического размерного анализа является множество вариантов технологических процессов изготовления деталей, задействованных в сборке, полученное в САПЛ-ТП.

Технологический размерный анализ заключается в построении графов возможных технологических процессов изготовления деталей. Граф представляет собой совмещение двух деревьев: производного и исходного. Производное дерево отображает технологические размеры, а исходное дерево – конструкторские размеры и размеры припусков.

Таким образом, граф технологического процесса позволяет в закодированной форме представить геометрическую структуру технологического процесса обработки и является его математической моделью. Применение

таких математических моделей позволит выбирать технологические процессы обработки элементов, удовлетворяющие требованиям по точности изготовления и требованиям сборки изделия.

На рис. 7 представлены размерные схемы (радиальное направление) двух вариантов

технологических процессов для детали «Ось» и их расчет на точность с применением теории графов, где  $A$  – конструкторские размеры,  $T$  – технологические размеры,  $Z$  – размер исходной заготовки,  $Z$  – припуски на механическую обработку.

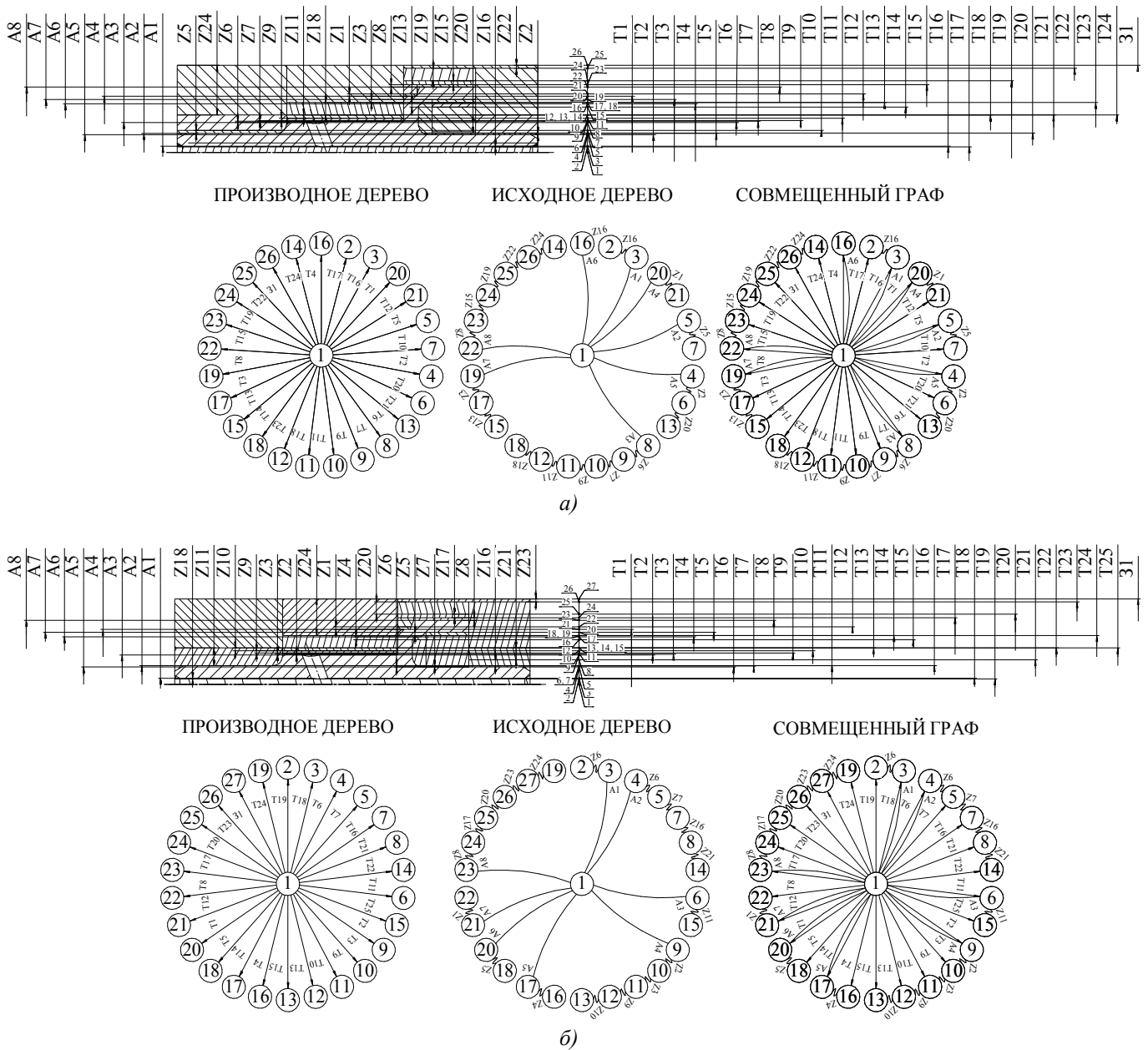


Рис. 7. Размерная схема и расчет на точность детали «Ось» для технологического процесса № 1 (а) и № 2 (б)

Для автоматизации расчета технологических размерных цепей использован подход, исходными данными для которого являются графы технологического процесса и размерные цепи. В нем используются две матрицы: номинальных размеров и допусков.

Преимущества данного подхода – отсутствие необходимости выявления увеличиваю-

щих и уменьшающих звеньев, отдельных размерных цепей и составления уравнений расчета; для расчета всех размеров и их допусков требуется составить только две матрицы смежности – допусков и средних размеров и размерную цепь; алгоритм не требует особой нумерации поверхностей; позволяет автоматизировать расчеты цепей отклонения формы и

расположения; одинаково подходит для размерного расчета технологических процессов деталей как типа «тело вращения», так и для более сложных изделий [7].

На заключительном этапе выбирается множество технологических процессов изготовления деталей, удовлетворяющих требованиям сборки, из которых определяется вариант рационального технологического процесса с учетом складывающейся производственной ситуации.

**Заключение.** Представлена структура и проанализированы возможные решения реализации комплекса проектных процедур, обеспечивающего эффективное выполнение сборочных операций на основе связи между ТПП обрабатывающего и сборочного производств высокоточных изделий, с учетом требований, заложенных при проектировании изделия. Реализация данного подхода в САПР-ТП является актуальной, т.к. комплекс проектных процедур позволит учитывать реально складывающуюся производственную ситуацию и выбирать рациональные технологические процессы обработки деталей с учетом требований сборки. Что, в свою очередь, позволит снизить трудоемкость, время изготовления и себестоимость, повысить качество и точность высокоточных изделий, сократить время и трудоемкость при ТПП.

Предлагаемый подход прошел производственные испытания в условиях филиала ФГУП «НПЦАП»–«ПО «Корпус»».

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семенов, А.Н. Проблемы теоретического обеспечения сборки высокотехнологичных изделий // Инструмент и технологии. – 2004. – № 21–22. – С. 122–124.
2. Суслов, А.Г. Научные основы технологии машиностроения / А. Г. Суслов, А. М. Дальский. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
3. Базров, Б.М. Основы технологии машиностроения: учебник. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.

4. Бочкарев, П.Ю. Системное представление планирования технологических процессов // Технология машиностроения. – 2002. – № 1. – С. 10–14.

5. Митин, С.Г., Бочкарев, П.Ю. Автоматизация принятия конструкторских решений в соответствии с технологическими возможностями многономенклатурных производственных систем // Научные технологии в машиностроении. – 2014. – № 11 (41). – С. 44–47.

6. Гаер, М.А., Журавлев, Д.А., Яценко, О.В. Конфигурационные пространства поверхностей деталей и сборок // Вестник ИрГТУ. – 2011. – № 10 (57). – С. 32–36.

7. Мухолзоев, А.В. Алгоритм модуля автоматизированного расчета технологических размерных цепей // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2015. – Т.15. №3. – С. 48–55.

## REFERENCES

1. Semyonov, A.N. Problems in theoretical support of high-technological products assembly // *Tool and Technologies*. – 2004. – № 21–22. – pp. 122–124.
2. Suslov, A.G. *Scientific Fundamentals in Mechanical Engineering* / A. G. Suslov, A. M. Dalsky. – M.: Mechanical Engineering, 2002. – pp. 684.
3. Bazrov, B.M. *Mechanical Engineering Fundamentals: textbook*. – M.: Mechanical Engineering, 2005. – pp. 736.
4. Bochkaryov, P.Yu. System concept in technological processes planning // *Engineering Techniques*. – 2002. – № 1. – pp. 10–14.
5. Mitin, S.G., Bochkaryov, P.Yu. Automation in design decision-making in accordance with technological potentialities of multi-range production systems // *Science intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2014. – № 11 (41). – pp. 44–47.
6. Gaer, M.A., Zhuravlyov, D.A., Yatsenko, O.V. Configuration spaces of surfaces in parts and assemblages // *Bulletin of IrSTU*. – 2011. – № 10 (57). – pp. 32–36.
7. Mukholzoev, A.V. Algorithm of module for automated computations of technological dimensional series // *Bulletin of SUrSU. "Mechanical Engineering" Set*. – 2015. – Vol.15. №3. – pp. 48–55.

Рецензент д.т.н. О.А. Горленко