

На правах рукописи



СЛАЩЕВ Евгений Сергеевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ТОЧНОСТИ СБОРКИ УЗЛОВ МАШИН МЕТОДОМ
ГРУППОВОЙ ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТИ С КОМПЕНСАЦИЕЙ
НЕЗАВЕРШЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ПЕНЗА 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ижевский государственный технический университет им. М. Т. Калашникова».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Осетров Владимир Григорьевич

**Официальные
оппоненты:**

Семенов Александр Николаевич, доктор
технических наук, профессор кафедры
«Технология авиационных двигателей и общего
машиностроения» ФГБОУ ВО «Рыбинский
государственный авиационный технический
университет им. П. А. Соловьева», г. Рыбинск;

Польский Евгений Александрович,
кандидат технических наук, доцент, заведующий
кафедрой «Технология машиностроения»
ФГБОУ ВО «Брянский государственный
технический университет», г. Брянск

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет», г. Пермь

Защита состоится 20 сентября 2018 г., в 14-00 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.186.03 на базе ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» по адресу: 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» и на сайте https://dissov.pnzgu.ru/ecspertiza/Tehnicheskie_nauki/slashchev

Автореферат разослан «___»_____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Воячек Игорь Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проблема достижения заданной точности при сборке машин при сокращении объема незавершенного производства не утратила своей актуальности. В то же время все более острой является проблема повышения производительности труда при технологической подготовке сборочных операций многономенклатурного производства.

В настоящее время накоплено большое количество методов и способов обеспечения точности замыкающего звена при сборке. Поэтому необходимо совершенствовать методики их рационального выбора и применения, расширять их технологические возможности, автоматизировать процесс принятия решений при технологической подготовке сборочного производства. Необходимо отметить, что выбор методов обеспечения точности сборки узлов машин до сих пор опирается на субъективный опыт технолога и не имеет достаточной формализации.

Эффективным методом обеспечения точности замыкающего звена, позволяющим снизить требования к величине производственного допуска на составляющих звеньях (детали), является метод групповой взаимозаменяемости (селективной сборки). Но из-за возникновения незавершенного производства, отсутствия формализованных методик расчета для многозвенных размерных цепей, влияния субъективных факторов данный метод широко не применяется на предприятиях машиностроения. В то же время применение данного метода позволяет значительно снизить трудоемкость изготовления деталей и сборочных единиц с введением лишь дополнительной операции – сортировки.

Для большинства существующих методов обеспечения точности замыкающего звена при сборке, особенно для метода групповой взаимозаменяемости, актуальным является уменьшение объема незавершенного производства. Для этих целей необходимо развивать весьма эффективный метод – метод регулирования с применением различных компенсаторов. В работе предложена технология сборки с применением новой конструкции сборного компенсатора со ступенчатым регулированием.

Таким образом, актуальными задачами в области повышения качества и производительности сборки узлов машин являются формализация выбора метода обеспечения точности, исследование и совершенствование метода групповой взаимозаменяемости, сокращение незавершенного производства путем разработки средств компенсации погрешностей при сборке, а также формализация и автоматизация проектирования при технологической подготовке сборочного производства.

Объект исследования – технологический процесс сборки узлов машин и методы обеспечения его точности.

Предметом исследования являются взаимосвязи в сборочных размерных цепях и методы управления ими с целью рационального обеспечения точности замыкающего звена и сокращения объема незавершенного производства.

Цель работы – снижение трудоемкости технологической подготовки производства и объема незавершенного производства путем формализации выбора

методов обеспечения точности сборки узлов машин, совершенствования метода групповой взаимозаменяемости применительно к многозвенным размерным цепям и метода регулирования с использованием сборных компенсаторов.

Задачи исследования:

1. Разработка математического аппарата и алгоритма выбора рационального метода обеспечения точности сборки узлов машин на основе совокупности критериев с применением логических функций.

2. Совершенствование метода групповой взаимозаменяемости для многозвенной размерной цепи путем разработки математических зависимостей и алгоритма формализованного определения групповых предельных размеров, необходимых для сортировки и сборки деталей.

3. Выявление типовых размерных связей, встречающихся при применении метода групповой взаимозаменяемости в производственной практике, и учет их особенностей при размерном анализе. Разработка соответствующих алгоритмов и программы.

4. Создание новой конструкции сборного компенсатора со ступенчатым регулированием и исследование его жесткости при действии осевой нагрузки.

5. Разработка способов и рациональной технологии применения сборного компенсатора для сокращения незавершенного производства при сборке узлов машин, в том числе при сборке методом групповой взаимозаменяемости с учетом его особенностей.

6. Разработка программного комплекса для определения параметров размерных цепей на основе разработанных методик.

7. Использование результатов исследований в производстве. Определение экономической эффективности. Проведение исследования на основе экспертного опроса для выявления эффективности разработанных методик и программных продуктов.

Методы исследования. При выполнении работы использовалась методология научных исследований, опирающаяся на основы технологии машиностроения, логику высказываний и булеву алгебру, теорию размерных цепей и размерный анализ, индуктивный способ исследования, методы объектно-ориентированного программирования и экспертного анализа качества объектов. При обработке результатов экспериментов использовалась математическая статистика.

Научная новизна (пп. 3, 4 паспорта специальности 05.02.08):

1. Предложена математическая модель, включающая систему критериев и логических (булевых) функций, на основе которой разработана методика формализованного выбора рационального метода обеспечения точности сборки узлов машин.

2. Применительно к типовым многозвенным размерным цепям, встречающимся в производственной практике, впервые построены рекуррентные зависимости для формализованного определения групповых предельных размеров звеньев, необходимых для сортировки и сборки деталей методом групповой взаимозаменяемости.

3. Предложена рациональная технология применения разработанного сборного компенсатора повышенной жесткости для сокращения незавершенного производства при сборке узлов машин, в том числе при сборке методом групповой взаимозаменяемости с учетом его особенностей, связанных с информацией о действительных размерах звеньев.

Практическая значимость:

1. Разработаны алгоритм и программа для формализованного выбора метода обеспечения (достижения) точности сборки узлов машин, что позволяет автоматизировать процесс технологической подготовки сборочного производства.

2. Разработаны методика, алгоритм и программа для расчета типовых многозвенных размерных цепей при сборке методом групповой взаимозаменяемости на основе разработанных рекуррентных зависимостей, что позволяет формализовать и автоматизировать процесс подготовки производства, снизить требования к квалификации технолога-проектировщика.

3. Внедрены в производство новая конструкция сборного компенсатора повышенной жесткости для обеспечения точности сборки методом ступенчатого регулирования (патент на полезную модель № 112331) и технология его рационального применения с целью уменьшения незавершенного производства и неэффективных затрат (патент на изобретение № 2592020).

4. Разработана методика оценки экономического эффекта от применения метода селективной сборки с учетом объема незавершенного производства.

5. Разработан программный комплекс для определения параметров размерных цепей на основе разработанных методик (2 свидетельства о государственной регистрации программ ЭВМ), эффективность которого подтверждена при экспертном опросе и внедрении в производство.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов обеспечиваются корректным применением положений технологии машиностроения, теории размерных цепей, математического аппарата алгебры логики, корректным проведением экспериментальных исследований, экспертного опроса, успешным использованием результатов на производстве, апробацией на научно-практических конференциях, наличием патентов.

Личный вклад. Основные научные и практические результаты исследования, составившие содержание диссертационной работы, получены автором лично или при его непосредственном участии.

На защиту выносятся:

1. Математическая модель оценки и выбора методов обеспечения точности сборки узлов машин на основе системы критериев и логических функций.

2. Рекуррентные зависимости для формализованного определения групповых предельных размеров звеньев многозвенных размерных цепей, встречающихся в производственной практике, и алгоритмы их применения.

3. Оригинальная конструкция сборного компенсатора со ступенчатым регулированием и результаты экспериментального исследования его жесткости при действии осевой нагрузки.

4. Технология рационального применения сборного компенсатора для уменьшения незавершенного производства при сборке узлов машин с учетом особенностей метода групповой взаимозаменяемости.

5. Определение экономической эффективности применения групповой сборки с учетом незавершенного производства.

6. Программа и результаты экспертной оценки качества разработанного программного комплекса для определения параметров размерных цепей на основе разработанных методик.

Реализация результатов. Разработанная методика и программа «Расчет размерных цепей – РРЦ» используются для конструкторско-технологических расчетов в особом конструкторском бюро и в отделе главного технолога ОАО «Ижевского мотозавода "Аксион-холдинг"». Программа «Экспертная оценка качества объекта» используется для оценки качества разрабатываемых изделий в ООО «Ижевский институт комплексного приборостроения». Разработанная конструкция сборного компенсатора используется в ремонтном процессе для регулировки зазоров в газовом оборудовании ООО «Энергоиндустрия».

Апробация работы. Результаты работы апробированы на научно-технических конференциях: «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики "АНТЭ-2011"» (Казань, 2011); научной конференции «Communication of students, master students and post-graduates in academic, professional and scientific fields» (Ижевск, 2011); 41, 42 и 46-й научно-практических конференциях Ижевского мотозавода «Аксион-холдинг» (Ижевск, 2012, 2013, 2016); II Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием «Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке» (Ижевск, 2013); Всероссийской научно-технической конференции «Инновации в науке, технике и технологиях» (Ижевск, 2014); открытом конкурсе инновационных проектов, посвященном 80-летию Конструкторско-технологического центра ОАО «Концерн «Калашников» (Ижевск, 2013); научно-практической конференции ОАО «Ижевский радиозавод» (Ижевск, 2014); XI Международной научно-технической конференции «Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства» (Ижевск, 2015); X и XI Международных научно-практических конференциях «Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управление проектами CAD/CAM/CAE/PDM» (Пенза, 2016, 2017).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 14 статей, из них 6 – в изданиях из перечня ВАК РФ, 1 монография. Получены 1 патент на изобретение и 1 патент на полезную модель, 2 свидетельства о государственной регистрации программ ЭВМ.

Структура работы. Диссертация общим объемом 188 страниц включает 159 страниц основного текста, приложения на 29 страницах, состоит из введения, пяти глав, заключения, содержит 66 рисунков в основном тексте и 7 в приложениях и 34 таблицы в основном тексте и 1 в приложениях, библиографический список из 103 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, рассмотрено состояние исследуемой проблемы, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, показаны научная новизна и практическая ценность диссертации, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проводится анализ проблемы обеспечения точности процесса сборки узлов машин. Вопросами теории и практики обеспечения (достижения) точности и компенсации погрешностей при сборке узлов машин занимались многие отечественные и зарубежные ученые: Б. С. Балакшин, Н. А. Гусев, М. С. Лебедевский, М. П. Новиков, Б. Ф. Федоров, А. Н. Семенов, В. В. Непомилуев, В. Г. Осетров, В. П. Мишунин, В. Л. Вейц, Ф. Шольц (корпорация «Боинг»), Г. Хензольд и др.

Большинство исследований посвящалось отдельным методам обеспечения точности сборки и, следовательно, качества машин. В существующих работах не решена задача формализованного выбора рационального метода обеспечения точности сборки, недостаточно рассмотрен ряд новых способов достижения точности замыкающего звена, в частности, путем компенсации и регулирования, ограничивается область применения метода групповой взаимозаменяемости при сборке.

В настоящее время метод групповой взаимозаменяемости (селективной сборки) рекомендуется применять для малозвенной размерной цепи с числом составляющих звеньев $m_1 \leq 3$. В основном все методики расчета сведены к соединениям из двух деталей. Отсутствуют зависимости для формализованного расчета многозвенных размерных цепей, что требует высокой квалификации инженеров-проектировщиков, а также существенных затрат времени при технологической подготовке производства.

Одной из основных проблем при сборке, в том числе и селективной, является наличие незавершенного производства. К основным методам снижения объемов незавершенного производства при использовании метода групповой взаимозаменяемости относятся: метод межгрупповой взаимозаменяемости, метод индивидуального подбора деталей и метод ступенчатого регулирования с применением компенсаторов, который рассматривается в гл. 4.

Классический метод регулирования с помощью неподвижных компенсаторов остается весьма эффективным и может быть усовершенствован с целью рационального сокращения незавершенного производства.

Разработанные методики расчета размерных цепей опираются на субъективный опыт проектировщика, недостаточно формализованы, что сдерживает создание эффективных программных комплексов для автоматизированных расчетов на ЭВМ. Современные программные комплексы не отражают в полной мере задачи технологической подготовки производства, ограничиваясь лишь методом максимума-минимума и теоретико-вероятностным.

Таким образом, подтверждена актуальность цели диссертационной работы: снижение трудоемкости технологической подготовки производства и объ-

ема незавершенного производства путем формализации выбора методов обеспечения точности сборки узлов машин, совершенствования метода групповой взаимозаменяемости применительно к многозвенным размерным цепям и метода регулирования с использованием сборных компенсаторов.

Во второй главе разработан формализованный подход к выбору метода достижения точности при сборке изделий. Выявлены шесть методов и четыре способа достижения точности замыкающего звена. Разработан математический аппарат для рационального выбора методов и способов.

Выбор предлагается осуществить по ряду критериев (таблица 1). В таблице приведены параметры применимости методов при данных значениях критериев в виде булевых переменных (1 или 0).

Таблица 1 – Оценка методов достижения точности замыкающего звена на основе критериев и логических функций

Критерии	Диапазоны изменения критериев	Методы									
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8	№ 9	№ 10
Объем выпуска изделий	$X1 < 2$	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1
	$X2 = 2..40$	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1
	$X3 > 40$	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
Температура эксплуатации изделия [°C]	$X4 < 80$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	$X5 = 80..150$	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
Число звеньев в цепи	$X6 \leq 5$	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1
	$X7 > 5$	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0
Точность замыкающего звена	$X8 \leq 7$	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0
	$X9 > 7$	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1
Наличие сил влияния	$X10$ – есть	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
	$X11$ – нет	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Подвижность соединения	$X12$ – подвижное	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	$X13$ – неподвижное	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1

П р и м е ч а н и е. В таблице: № 1, № 2, № 3 – методы полной, групповой взаимозаменяемости, № 4 – метод регулирования, № 5 – метод пригонки, № 6 – метод индивидуальной селекции, № 7 – способ взаимной компенсации, № 8 – способ деформации звеньев, № 9 – метод компенсирующих материалов, № 10 – способ фиксированной сборки; 1 – означает, что метод можно применить, 0 – нельзя.

Для формализованного выбора определена система управляющих логических (булевых) функций для каждого метода:

$$\begin{aligned}
 F_1 &= (x_1 \vee x_2 \vee x_3) \cdot (x_4 \vee x_5) \cdot (x_6 \vee \bar{x}_7) \cdot (\bar{x}_6 \vee x_9) \cdot (x_{10} \vee x_{11}) \cdot (x_{12} \vee x_{13}), \\
 F_2 &= (x_1 \vee x_2 \vee \bar{x}_3) \cdot (x_4 \vee x_5) \cdot (\bar{x}_6 \vee x_7) \cdot (x_8 \vee \bar{x}_9) \cdot (x_{10} \vee x_{11}) \cdot (x_{12} \vee x_{13}), \\
 F_3 &= (x_1 \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_3) \cdot (x_4 \vee x_5) \cdot (\bar{x}_6 \vee x_7) \cdot (x_8 \vee \bar{x}_9) \cdot (x_{10} \vee x_{11}) \cdot (x_{12} \vee x_{13}), \\
 F_4 &= (x_1 \vee x_2 \vee x_3) \cdot (x_4 \vee x_5) \cdot (\bar{x}_6 \vee x_7) \cdot (x_8 \vee \bar{x}_9) \cdot (x_{10} \vee x_{11}) \cdot (x_{12} \vee x_{13}), \\
 F_5 &= (\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 \vee x_3) \cdot (x_4 \vee x_5) \cdot (\bar{x}_6 \vee x_7) \cdot (x_8 \vee \bar{x}_9) \cdot (x_{10} \vee x_{11}) \cdot (x_{12} \vee x_{13}),
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$F_6 = (\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 \vee x_3) \cdot (x_4 \vee \bar{x}_5) \cdot (\bar{x}_6 \vee x_7) \cdot (x_8 \vee x_9) \cdot (\bar{x}_{10} \vee x_{11}) \cdot (\bar{x}_{12} \vee x_{13}),$$

$$F_7 = (\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 \vee x_3) \cdot (x_4 \vee \bar{x}_5) \cdot (\bar{x}_6 \vee x_7) \cdot (\bar{x}_8 \vee x_9) \cdot (x_{10} \vee x_{11}) \cdot (\bar{x}_{12} \vee x_{13}),$$

$$F_8 = (\bar{x}_1 \vee x_2 \vee x_3) \cdot (x_4 \vee \bar{x}_5) \cdot (x_6 \vee x_7) \cdot (x_8 \vee x_9) \cdot (x_{10} \vee \bar{x}_{11}) \cdot (\bar{x}_{12} \vee x_{13}),$$

$$F_9 = (\bar{x}_1 \vee x_2 \vee x_3) \cdot (x_4 \vee \bar{x}_5) \cdot (x_6 \vee x_7) \cdot (\bar{x}_8 \vee x_9) \cdot (x_{10} \vee \bar{x}_{11}) \cdot (\bar{x}_{12} \vee x_{13}),$$

$$F_{10} = (x_1 \vee x_2 \vee x_3) \cdot (x_4 \vee \bar{x}_5) \cdot (x_6 \vee x_7) \cdot (\bar{x}_8 \vee x_9) \cdot (x_{10} \vee \bar{x}_{11}) \cdot (\bar{x}_{12} \vee x_{13}).$$

На основе таблицы 1 и формул (1) составлены алгоритм и программа, которая является начальным блоком в общей программе по проектированию размерных цепей.

Новизна данной методики выбора метода достижения точности замыкающего звена заключается в том, что учитываются не только число звеньев, объем выпуска изделий и точность замыкающего звена, но и новые критерии: температура эксплуатации узла, наличие сил влияния, подвижность соединения. Кроме того, сравнительная оценка методов впервые осуществляется с помощью логических (булевых) функций, что позволяет автоматизировать процедуру выбора рационального метода.

Следует также отметить, что предлагаемая методика (см. таблицу 1) имеет свойство к расширению, как по методам достижения точности, так и по критериям. В частности, для метода групповой взаимозаменяемости при дальнейших исследованиях (глава 3) выявлено, что можно снять ограничение по критерию «Число звеньев в цепи».

В третьей главе осуществлено совершенствование метода групповой взаимозаменяемости при обеспечении точности замыкающего звена. Существующие методики расчета размерной цепи при применении метода групповой взаимозаменяемости разработаны для коротких цепей с небольшим числом составляющих звеньев $m \leq 3$, которые сортируются на группы. Это ограничивает более широкое применение данного метода. Совершенствование метода групповой взаимозаменяемости при обеспечении точности замыкающего звена заключается в разработке методики расчета размерной цепи с помощью выведенных рекуррентных зависимостей, позволяющих определить верхние и нижние отклонения размеров для многозвенной размерной цепи, на основе которых организуются необходимые условия для сортировки и сборки деталей. При этом число составляющих звеньев, сортируемых на группы, не имеет существенного значения. Для вывода рекуррентных зависимостей для каждой типовой задачи, встречающейся в производственной практике, сформулированы и использованы правила и ограничения при назначении и построении схем полей допусков размеров, входящих в размерную цепь, которые заключаются в следующем.

Правило 1. Если в размерной цепи с замыкающим звеном в виде зазора два и более увеличивающих звена, то при выводе рекуррентных зависимостей их допуски на схеме располагаются в виде суммарного (объединенного) допуска по вертикали, причем объединение допусков производится по соответствующим группам (рисунок 1).

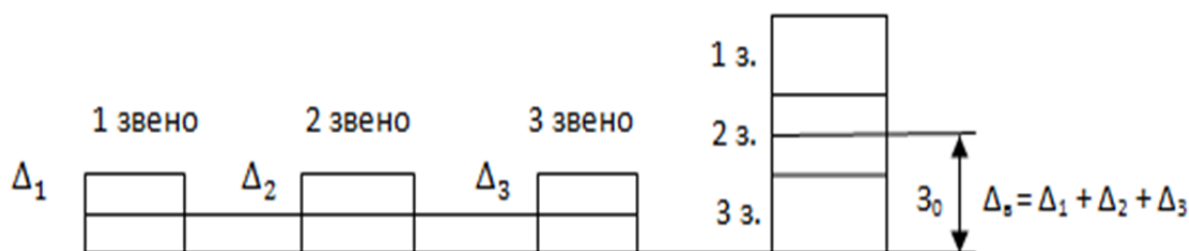


Рисунок 1 – Расположение полей допусков
(Δ_i – середины координат полей допусков звеньев)

Правило 2. Используется соотношение: координата середины поля допуска замыкающего звена должна быть равна сумме координат середин полей допусков составляющих звеньев с соответствующим передаточным отношением. Графически на схеме расположения полей допусков это достигается следующим образом:

– если замыкающее звено – зазор, то поле допуска одного из уменьшающих звеньев располагается относительно поля допуска первой группы увеличивающего звена со сдвигом на величину минимального зазора, а поля допусков других уменьшающих звеньев располагаются на своей месте (под нулевой линией, основное отклонение – h);

– если замыкающее звено – натяг, то поле допуска одного из увеличивающих звеньев располагается относительно поля допуска последней группы уменьшающего звена со сдвигом на величину минимального натяга, а поля допусков других увеличивающих звеньев располагаются на нулевой линии.

Правило 3. Принимается равенство суммы допусков увеличивающих и уменьшающих составляющих звеньев.

Правило 4. Номера сортировочных групп на схеме полей допусков указываются сверху вниз. На первом месте в обозначении группового допуска стоит номер группы, на втором месте – номер звена.

Для вывода рекуррентных зависимостей, приведенных ниже, выявлены пять типовых задач (рисунки 2–5), когда замыкающим звеном размерной цепи является зазор, и три задачи, когда замыкающее звено – натяг (рисунки 6–8).

Задача 1 (замыкающее звено – зазор). Дана трехзвенная размерная цепь (рисунок 2) способ равных допусков.

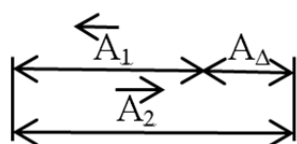


Рисунок 2 – Трехзвенная
размерная цепь

Для увеличивающего звена (стрелка вправо):

$$ES \overline{A_2(i)} = TD \left(1 - \frac{i-1}{n} \right), \quad (2)$$

$$EI \overline{A_2(i)} = TD \left(1 - \frac{i}{n} \right), \quad (3)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$ – текущая переменная, характеризующая номер группы; TD – допуск увеличивающего звена.

Для уменьшающего звена (стрелка влево):

$$es \overline{A_1(i)} = Td \left(1 - \frac{i}{n} \right) - S_{\min}, \quad (4)$$

$$ei \overline{A_1(i)} = Td \left(1 - \frac{i+1}{n} \right) - S_{\min}, \quad (5)$$

где $S_{\min}$ – минимальный зазор, Td – допуск уменьшающего звена.

Задача 2 (замыкающее звено – зазор). Дана многозвенная размерная цепь (рисунок 3), количество уменьшающих звеньев $m_{\text{ум}} \geq 1$, используется способ равных допусков.

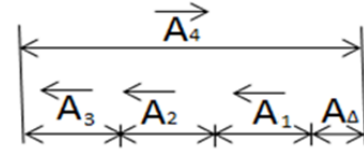


Рисунок 3 – Многозвенная размерная цепь (задача 2)

Для увеличивающего звена используются формулы (2) и (3). Для уменьшающих звеньев формулы

$$es \overline{A(i, j)} = \left(Td - \frac{Td}{n} - S_{\min} \right) \frac{\prod_{k=2}^{m_{\text{ум}}} (k - j)}{(m_{\text{ум}} - 1)!} - \frac{Td \cdot (i - 1)}{m_{\text{ум}} \cdot n}, \quad (6)$$

$$ei \overline{A(i, j)} = \left(Td - \frac{Td}{n} - S_{\min} \right) \frac{\prod_{k=2}^{m_{\text{ум}}} (k - j)}{(m_{\text{ум}} - 1)!} - \frac{Td \cdot (i)}{m_{\text{ум}} \cdot n}, \quad (7)$$

где произведение определяется следующим образом (8)*

$$\frac{\prod_{k=2}^{m_{\text{ум}}} (k - j)}{m_{\text{ум}}!} = \frac{(2 - j)(3 - j)(4 - j)}{1 \cdot 2 \cdot (m_{\text{ум}} - 1)}. \quad (8)$$

Для схемы на рисунке 4: $m_{\text{ум}} = 3$; $i = 1, 2$; $j = 1, 2, 3$.

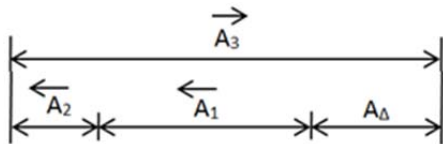


Рисунок 4 – Многозвенная размерная цепь (задача 3)

Задача 3 (замыкающее звено – зазор). Дана многозвенная размерная цепь (рисунок 4), количество уменьшающих звеньев $m_{\text{ум}} \geq 1$, используется способ допусков равной точности.

Для увеличивающего звена используются формулы (2) и (3). Для определения верхних и нижних отклонений уменьшающих звеньев для каждой группы необходимо использовать рекуррентные зависимости (9) и (10) с учетом группового допуска (11)

$$es \overline{A(i, j)} = \left(Td - \frac{Td}{n} - S_{\min} \right) \frac{\prod_{k=2}^{m_{\text{ум}}} (k - j)}{(m_{\text{ум}} - 1)!} - T(i, j) \cdot (i - 1), \quad (9)$$

$$ei \overline{A(i, j)} = \left(Td - \frac{Td}{n} - S_{\min} \right) \frac{\prod_{k=2}^{m_{\text{ум}}} (k - j)}{(m_{\text{ум}} - 1)!} - T(i, j) \cdot (i), \quad (10)$$

где для схемы на рисунке 3: $m_{\text{ум}} = 2$; $i = 1, 2, 3$; $j = 1, 2$.

При способе равной точности групповой допуск для уменьшающих звеньев равен

$$T(i, j) = a \cdot e_j, \quad (11)$$

где a – количество единиц допуска, определяется по формуле

$$a = \frac{\sum Td}{n \cdot \sum_{j=1}^{m_{\text{ум}}} e_j} = \frac{\sum Td}{n \cdot (e_1 + e_2 + \dots + e_{m_{\text{ум}}})}, \quad (12)$$

где e_j – единица допуска (13), зависящая от номинального размера звена A_j :

$$e_j = 0,45\sqrt[3]{A_j} + 0,001A_j. \quad (13)$$

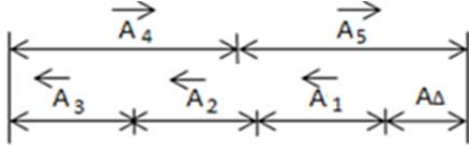


Рисунок 5 – Многозвенная размерная цепь (задачи 4 и 5)

Задача 4 (замыкающее звено – зазор).

Дана многозвенная размерная цепь (рисунок 5), количество увеличивающих и уменьшающих звеньев: $m_{\text{ув}} \geq 1$ и $m_{\text{ум}} \geq 1$, используется способ равных допусков.

Для уменьшающих звеньев используются формулы (6) и (7). Расчет для увеличивающих звеньев проводится по рекуррентным зависимостям

$$ES \overrightarrow{A(i, k)} = \frac{TD}{m_{\text{ув}}} \left(1 - \frac{i-1}{n} \right), \quad (14)$$

$$EI \overrightarrow{A(i, k)} = ES \overrightarrow{A(i, k)} - \frac{TD}{m_{\text{ув}} \cdot n}, \quad (15)$$

где $k = m_{\text{ум}} + j; j = 1, 2 \dots 5$.

Задача 5 (замыкающее звено – зазор). Дана многозвенная размерная цепь (рисунок 5), количество увеличивающих и уменьшающих звеньев: $m_{\text{ув}} \geq 1$ и $m_{\text{ум}} \geq 1$, используется способ допусков равной точности.

Для уменьшающего звена используются формулы (9) и (10). Расчет для увеличивающих звеньев проводится по рекуррентным зависимостям

$$ES \overrightarrow{A(i, j)} = \left(TD - \frac{TD}{n} - S_{\min} \right) \cdot \frac{\prod_{k=2}^{m_{\text{ув}}} (k-j)}{(m_{\text{ув}})!} - T(i, j) \cdot (i-n), \quad (16)$$

$$EI \overrightarrow{A(i, j)} = \left(TD - \frac{TD}{n} - S_{\min} \right) \cdot \frac{\prod_{k=2}^{m_{\text{ув}}} (k-j)}{(m_{\text{ув}})!} - T(i, j) \cdot (i-(n-1)). \quad (17)$$

Задача 1 (замыкающее звено – натяг). Дана трехзвенная размерная цепь (рисунок 6), используется способ равных допусков.

Для уменьшающих звеньев – зависимости

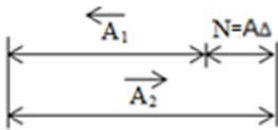


Рисунок 6 – Многозвенная размерная цепь (задача 1)

$$es \overleftarrow{A(i)} = Td \left(1 - \frac{i-1}{n} \right), \quad (18)$$

$$ei \overleftarrow{A(i)} = Td \left(1 - \frac{i}{n} \right), \quad (19)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$ – текущая переменная, характеризующая количество групп, Td – допуск уменьшающего звена, так как с увеличением диаметра отверстия натяг уменьшается.

Верхнее и нижнее отклонения увеличивающих звеньев – зависимости

$$ES \overline{A(i)} = \frac{TD}{n}(2 + n - i) + N_{\min}, \quad (20)$$

$$EI \overline{A(i)} = \frac{TD}{n}(1 + n - i) + N_{\min}, \quad (21)$$

где $N_{\min}$ – минимальный натяг, TD – допуск увеличивающего звена – вала, так как с увеличением диаметра вала натяг (замыкающее звено) увеличивается.

Задача 2 (замыкающее звено – натяг). Дана многозвенная размерная цепь (рисунок 7), количество увеличивающих звеньев $m_{ув} \geq 1$, используется способ равных допусков.

Для уменьшающего звена используются формулы (18) и (19). Верхнее и нижнее отклонения увеличивающих звеньев – зависимости

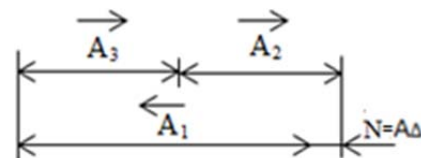


Рисунок 7 – Многозвенная размерная цепь (задача 2)

$$ES \overline{A(i, j)} = \left(\frac{Td}{n} + N_{\min} \right) \frac{\prod_{k=2}^m (k - (j - m_{ум}))}{(m - 1)!} + \frac{TD}{m_{ув}} \left(1 - \frac{(i - 1)}{n} \right), \quad (22)$$

$$EI \overline{A(i, j)} = \left(\frac{Td}{n} + N_{\min} \right) \frac{\prod_{k=2}^m (k - (j - m_{ум}))}{(m - 1)!} + \frac{TD}{m_{ув}} \left(1 - \frac{(i)}{n} \right), \quad (23)$$

где m – количество составляющих звеньев.

Задача 3 (замыкающее звено – натяг). Дана многозвенная размерная цепь (рисунок 7), количество увеличивающих звеньев $m_{ув} \geq 1$, используется способ допусков равной точности.

Для уменьшающего звена используются формулы (18) и (19). Верхнее и нижнее отклонения увеличивающих звеньев – зависимости

$$ES \overline{A(i, j)} = \left(\frac{Td}{n} + N_{\min} \right) \frac{\prod_{k=2}^m (k - (j - m_{ум}))}{(m - 1)!} + T(i, j) \cdot n \cdot \left(1 - \frac{(i - 1)}{n} \right), \quad (24)$$

$$EI \overline{A(i, j)} = \left(\frac{Td}{n} + N_{\min} \right) \frac{\prod_{k=2}^m (k - (j - m_{ум}))}{(m - 1)!} + T(i, j) \cdot n \cdot \left(1 - \frac{(i)}{n} \right). \quad (25)$$

Групповой допуск определяется по формуле (11), количество единиц допуска, определяется по формуле

$$a_j = \frac{Td}{n \cdot \sum_{j=1}^{m_{ув}} e_j} = \frac{Td}{n \cdot (e_1 + e_2 + \dots + e_{m_{ув}})}, \quad (26)$$

где e_j – единица допуска, определяемая по формуле (13).

Одной из важнейших задач совершенствования метода групповой взаимозаменяемости при сборке узлов машин является рациональное снижение объемов незавершенного производства, рассматриваемое ниже.

В четвертой главе исследуются способы рационального уменьшения незавершенного производства при сборке методом ступенчатого регулирования с применением разработанного сборного компенсатора, конструкция которого представлена на рисунке 8 (патент РФ на полезную модель № 112331).

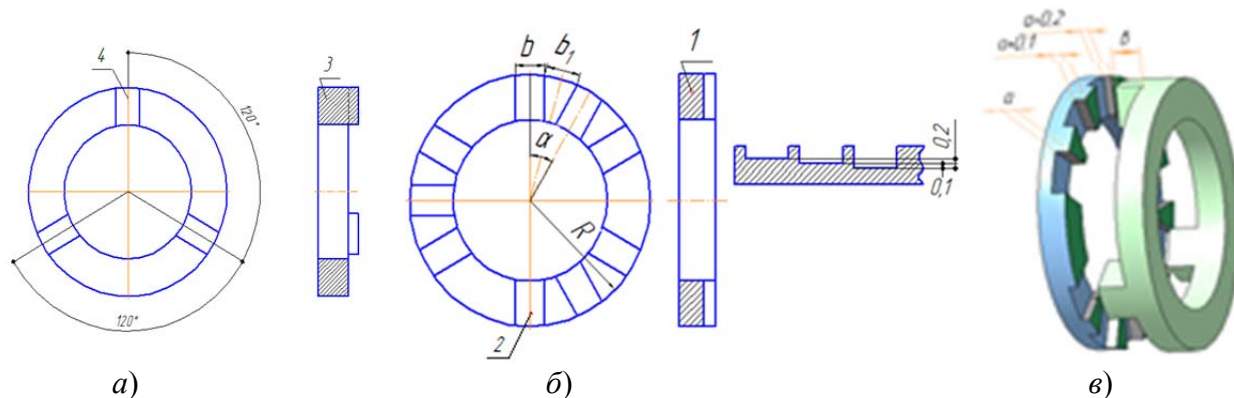


Рисунок 8 – Сборный компенсатор с мерными пазами:

a – кольцо с тремя выступами; *b* – кольцо с пазами; *в* – трехмерная модель компенсатора

В процессе сборки необходимый компенсационный размер между наружными торцами колец достигается путем поворота одного из колец, чтобы выступы соединились с пазами соответствующей глубины.

Преимуществом разработанного компенсатора являются повышение технологичности конструкции, простота применения при сборке и возможность многократного использования. Одновременно достигается повышение жесткости данного компенсатора по сравнению, например, с компенсатором, составленным из набора колец, что исследовано экспериментально (рисунок 9). Компенсаторы с двумя и тремя выступами сравнивались с набором колец, ступени которых рассчитаны по геометрической и арифметической прогрессиям. Образцы изготавливались из трубы с наружным диаметром 80 мм, толщиной стенки 20 мм, материал – алюминиевый сплав марки Д16, без термической обработки. Компенсаторы испытывались при осевой нагрузке до 20 кН (Испытательная установка Instron 5982). При этом фиксировалась величина абсолютной деформации (перемещение торцевых поверхностей) компенсаторов.

Результаты испытания компенсаторов представлены на рисунке 9,а. В сравнении со средним значением абсолютного перемещения относительный диапазон вариации результатов, определенный по шести образцам, не превышал 10 %. При этом наиболее высокой и стабильной жесткостью (наименьшие абсолютные перемещения и относительная вариация результатов) при действии осевой нагрузки обладает разработанный компенсатор с тремя и двумя выступами.

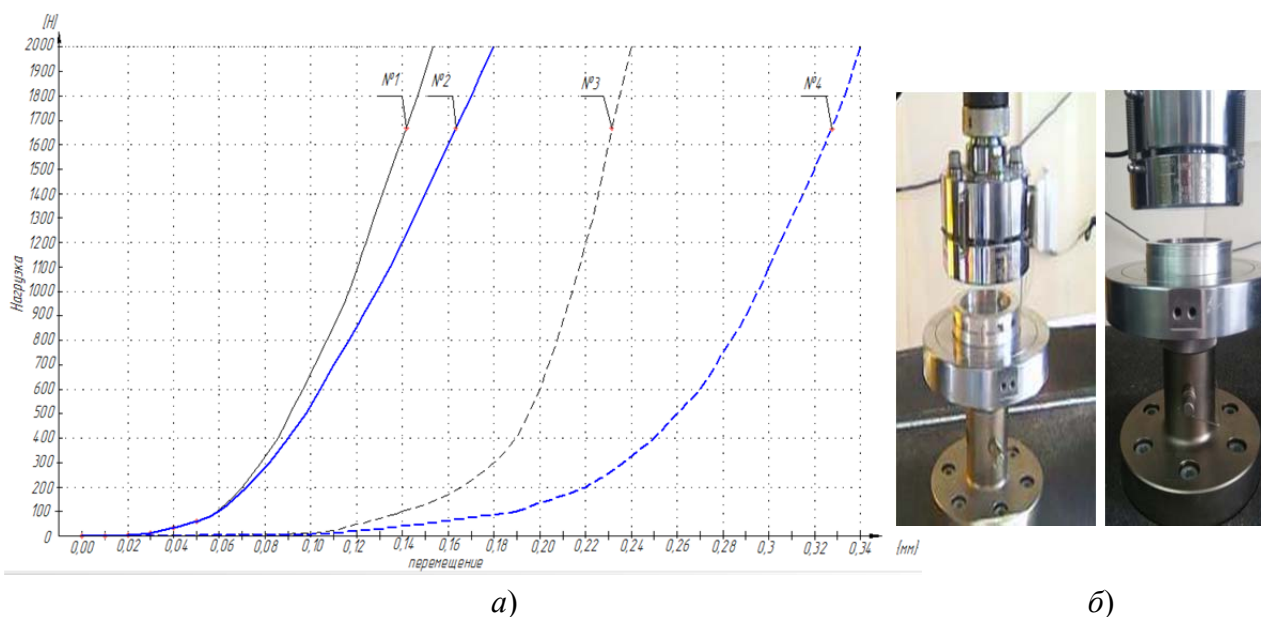


Рисунок 9 – Зависимости перемещений торцевых поверхностей компенсаторов от осевой нагрузки (а): № 1 – разработанный компенсатор с 3 выступами, № 2 – разработанный компенсатор с 2 выступами, № 3 – набор сменных колец, рассчитанных по геометрической прогрессии, № 4 – набор сменных колец, рассчитанных по арифметической прогрессии; испытательная установка (б)

Применение разработанного компенсатора рассматривается на примере способа регулирования осевого зазора в узле с подшипниками качения (рисунок 10), на который получен патент на изобретение № 2592020. Способ предполагает изготовление ступеней компенсатора с использованием метода групповой взаимозаменяемости. Крышка 3 (рисунок 10) является частью разработанного компенсатора, на ней формируются выступы.

Число ступеней компенсации определяется с использованием метода групповой взаимозаменяемости с учетом, что звенья цепи A выполняются с технологически достижимыми допусками. Узел собирается частично, измеряется промежуточное замыкающее звено A_{Δ} (см. рисунок 10, б), определяется нужный паз основного кольца компенсатора, цепь частично разбирается, компенсатор собирается и устанавливается в корпус, узел собирается окончательно.

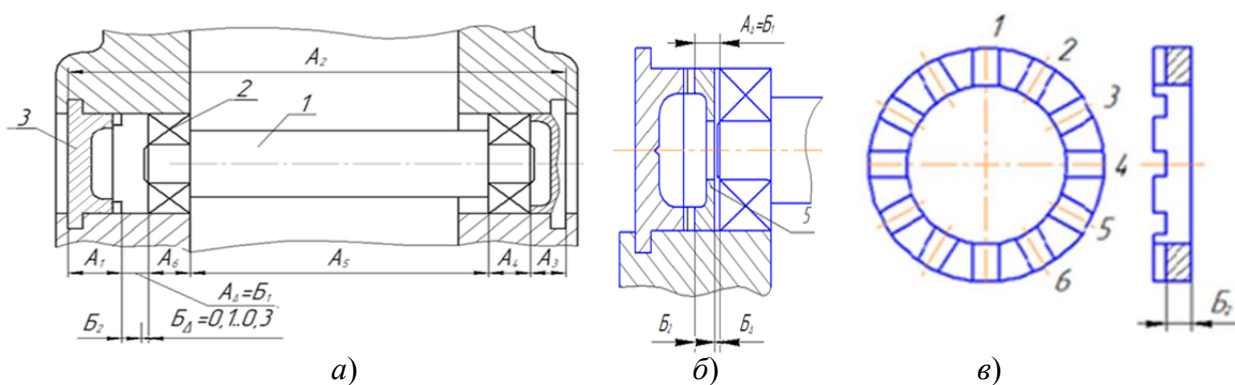


Рисунок 10 – Общий вид узла редуктора с подшипниками качения (а): 1 – промежуточный вал; 2 – подшипник; 3 – крышка с выступами), эскиз узла после установки компенсатора (б); основное кольцо с пазами (в)

Использование разработанного сборного компенсатора для компенсации незавершенного производства при селективной сборке предлагается осуществлять следующими способами.

Первый способ предполагает изначальную замену одной из деталей на сборный компенсатор, который также по размеру между наружными торцевыми поверхностями разбивается на группы. При этом несколько усложняется конструкция, но полностью отсутствует незавершенное производство.

Второй способ предполагает применение компенсатора только на этапе незавершенного производства. При этом компенсатор заменяет одну из деталей, наиболее подходящую по форме. Незавершенное производство имеет место в виде оставшихся деталей, которые заменил компенсатор.

Следует отметить, что компенсатор при реализации этих способов применяется в сочетании с методом групповой взаимозаменяемости, вследствие чего имеется существенное информационное преимущество – известны действительные размеры деталей, по которым они разбивались на группы. В результате можно упростить конструкцию компенсатора (сократить число ступеней) и исключить процесс измерения замыкающего звена при сборке.

Сочетание метода групповой взаимозаменяемости и регулирования рассмотрим на конкретном примере.

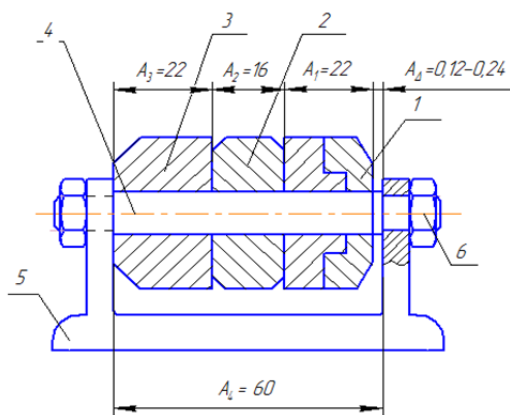


Рисунок 11 – Эскиз конструкции узла:

1 – сборочная единица-компенсатор;
2 – направляющее кольцо; 3 – точило;
4 – ось; 5 – корпус; 6 – гайка

1. Эскиз собираемой конструкции показан на рисунке 11. Максимальный и минимальный зазор (замыкающее звено) $A_{\Delta\max} = S_{\max} = 0,24$ мм, $A_{\Delta\min} = S_{\min} = 0,12$ мм. Номинальные размеры звеньев размерной цепи: уменьшающих – $A_1 = 22$ мм, $A_2 = 16$ мм, $A_3 = 22$ мм, увеличивающего – $A_4 = 60$ мм.

2. Если применять метод полной взаимозаменяемости при сборке, то средний допуск на изготовление звеньев $TA_i = 0,025$ мм, что экономически неэкономично, в связи с этим назначаются расширенные допуски: $TA_4 = 0,24$ мм; $TA_3 = 0,08$ мм; $TA_2 = 0,08$ мм; $TA_1 = 0,08$ мм. При сборке рационально применить метод групповой взаимозаменяемости.

3. Обеспечение точности сборки методом групповой взаимозаменяемости:

а) находится групповой допуск

$$T_{\text{гр}} = \frac{TS}{2} = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{2} = \frac{0,12}{2} = 0,06 \text{ мм};$$

б) количество групп $n = TD/T_{\text{гр}} = 0,24/0,06 = 4$;

в) проверяется равенство сумм допусков увеличивающих и уменьшающих звеньев: $TD = Td = 0,24$ мм;

г) рассчитываются верхние и нижние отклонения по рекуррентным формулам (2) и (3) для увеличивающих звеньев и (6) и (7) для уменьшающих звеньев (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты решения размерной цепи (мм)

Группа	$A_3 = 22$		$A_2 = 16$		$A_1 = 22$		$A_4 = 60$		Зазор		TS
	es	ei	es	ei	es	ei	ES	EI	S_{min}	S_{max}	
1	0	-0,02	0	-0,02	0,06	0,04	0,24	0,18	0,24	0,12	0,12
2	-0,02	-0,04	-0,02	-0,04	0,04	0,02	0,18	0,12	0,24	0,12	0,12
3	-0,04	-0,06	-0,04	-0,06	0,02	0	0,12	0,06	0,24	0,12	0,12
4	-0,06	-0,08	-0,06	-0,08	0	-0,02	0,06	0	0,24	0,12	0,12

4. Проектирование конструкции компенсатора:

а) определяется величина компенсации при использовании метода ступенчатого регулирования по формулам

$$K_{max} = \sum_{i=1}^m \overrightarrow{A_{yb(max)}} - \sum_{i=1}^m \overleftarrow{A_{ym(min)}} - S_{max}, \quad (27)$$

$$K_{min} = \sum_{i=1}^m \overrightarrow{A_{yb(min)}} - \sum_{i=1}^m \overleftarrow{A_{ym(max)}} - S_{min}, \quad (28)$$

$$K_{max} = 60,24 - (21,98 + 15,92 + 21,92) - 0,24 = 0,18 \text{ мм};$$

$$K_{min} = 60 - (22,06 + 16 + 22) - 0,12 = -0,18 \text{ мм};$$

б) определяется число ступеней компенсации (пазов):

$$n_1 = (K_{max} - K_{min}) / S_{min} + 1; n_1 = (0,18 + 0,18) / 0,12 + 1 = 4;$$

в) рассчитывается компенсационное изменение (от нулевого начального положения) размеров ступеней и размеры li перемычек компенсатора:

0 ступень: $\Delta_{k0} = 0$; $l_0 = 5_{-0,02}^{0,02}$ мм;

1 ступень: $\Delta_{k1} = +0,18$ мм; $l_1 = 5,18_{-0,02}^{0,02}$ мм;

2 ступень: $\Delta_{k2} = +0,06$ мм; $l_2 = 5,06_{-0,02}^{0,02}$ мм;

3 ступень: $\Delta_{k3} = -0,06$ мм; $l_3 = 4,94_{-0,02}^{0,02}$ мм;

4 ступень: $\Delta_{k4} = -0,18$ мм; $l_4 = 4,82_{-0,02}^{0,02}$ мм.

При этом размер от торца кольца компенсатора до выступа равен $l_b = 17_{+0,04}^{+0,04}$. Разрабатывается конструкция компенсатора (рисунок 12).

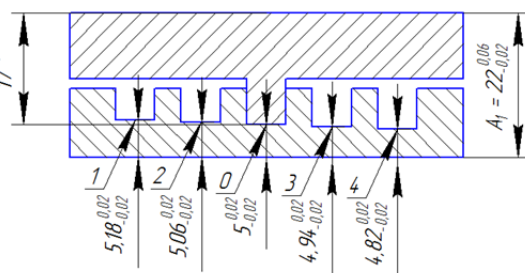


Рисунок 12 – Развертка конструкции компенсатора со ступенями компенсации

5. Сортировка деталей. Производится измерение и сортировка деталей по группам в тару, что условно показано на рисунке 13.

6. Компенсация незавершенного производства:

а) собираемость идеального случая (равное число деталей в группе) рассматривается на примере первой сортировочной группы:

$$\text{условие собираемости} \quad S_{min} \leq A_{\Delta i} \leq S_{max}, \quad (29)$$

где $A_{\Delta i}$ – величина зазора после сборки.

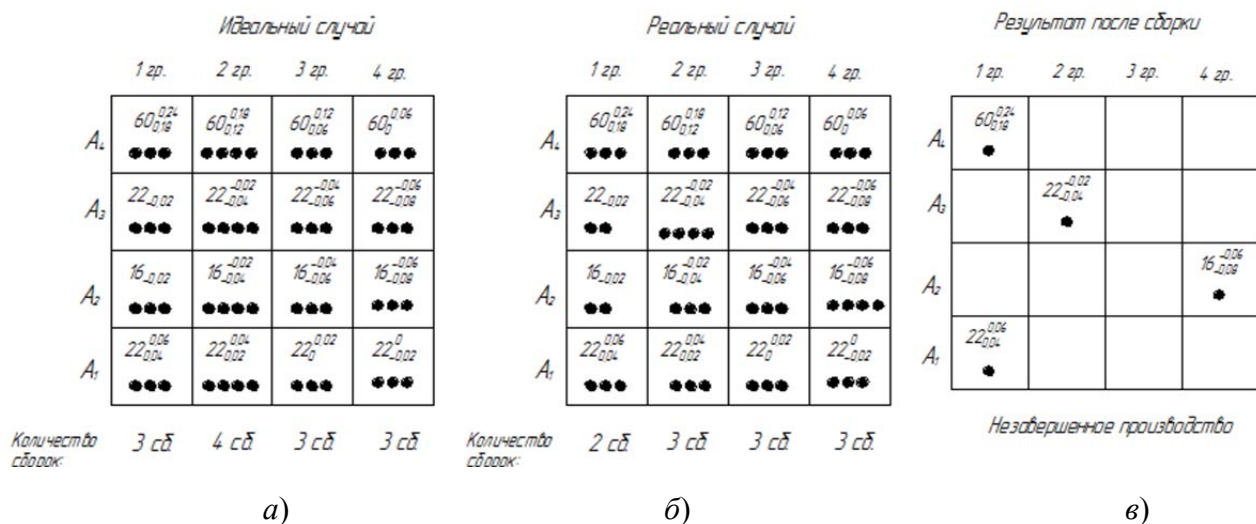


Рисунок 13 – Расположение деталей в сортировочной таре: а – идеальный случай (количество деталей в соответствующих группах одинаково, незавершенное производство отсутствует); б – реальный случай, имеется незавершенное производство; в – оставшиеся детали

$$A_{\Delta \max} = \sum_{i=1}^m \overrightarrow{A_{ув(max)}} - \sum_{j=1}^n \overleftarrow{A_{ум(min)}}, \quad (30)$$

$$A_{\Delta \min} = \sum_{i=1}^m \overrightarrow{A_{ув(min)}} - \sum_{j=1}^n \overleftarrow{A_{ум(max)}}, \quad (31)$$

где m – количество увеличивающих звеньев в размерной цепи (счетчик i); n – количество уменьшающих звеньев в размерной цепи (счетчик j),

$$A_{\Delta \max} = 60,24 - 21,98 - 15,98 - 22,04 = 0,24 \text{ мм};$$

$$A_{\Delta \min} = 60,18 - 22 - 16 - 22,06 = 0,12 \text{ мм}.$$

Условие для $A_{\Delta \max}$ и $A_{\Delta \min}$ выполняется, в таре после сборки изделия комплектов не остается;

б) рассматривается собираемость для произвольного реального случая (рисунок 13,б).

Рассчитываются $A_{\Delta \max}$ и $A_{\Delta \min}$ по формулам (30, 31):

$$A_{\Delta \max} = 60,24 - 21,96 - 15,92 - 22,04 = 0,32 \text{ мм};$$

$$A_{\Delta \min} = 60,18 - 21,98 - 15,94 - 22,06 = 0,2 \text{ мм}.$$

Таким образом, имеется вероятность невыполнения условия собираемости (29) в том случае, когда действительный размер замыкающего звена будет в диапазоне $0,24 \text{ мм} < A_{\Delta \text{д}} \leq 0,32 \text{ мм}$.

При выборе нужной ступени компенсации размерная цепь не собирается и замыкающий размер не измеряется. Используется информация о действительных размерах звеньев, полученная при сортировке. Действительный размер замыкающего звена определяется расчетом и, если он находится в диапазоне $0,30 \text{ мм} \leq A_{\Delta \text{д}} \leq 0,32 \text{ мм}$, то используется первая ступень компенсации, если в диапазоне $-0,24 \text{ мм} < A_{\Delta \text{д}} < 0,30 \text{ мм}$, то используется вторая ступень компенсации, а если в диапазоне $0,20 \text{ мм} \leq A_{\Delta \text{д}} \leq 0,24 \text{ мм}$, то компенсации не требуется (при сборке компенсатор остается в нулевом положении). Незавершенное производство исключается.

В пятой главе приводятся результаты практического применения итогов диссертационной работы.

Технико-экономическое обоснование применения метода групповой взаимозаменяемости приведено для приспособления по переработки твердых бытовых отходов.



Рисунок 14 – Схемы и стенды для измерения размеров уменьшающей (а) и увеличивающей (б) ветвей размерной цепи

Расчет методом групповой взаимозаменяемости с использованием рекуррентных зависимостей и последующий эксперимент осуществлены для партии приспособлений в количестве 100 шт. При эксперименте (рисунок 14) определено действительное распределение размеров увеличивающей и уменьшающей ветвей размерной цепи и на основе расхождения законов их распределения определен объем незавершенного производства. С учетом незавершенного производства экономический эффект при применении метода групповой взаимозаменяемости при годовом выпуске изделий $N_{г} = 10000$ шт. составил $\Xi = 931700$ руб.

На основе разработанных методик формализованного выбора метода обеспечения точности сборки и определения параметров размерных цепей разработана комплексная программа «Расчет размерных цепей – РРЦ» (свидетельство о регистрации программы ЭВМ № 2013616797, программа внедрена в производство). Проводилось сравнение данной программы с расчетом размерных цепей по программам Компас 3D16 и Mathcad15. При экспертном опросе использовалась оригинальная программа «Экспертная оценка качества объекта» (рисунок 15).

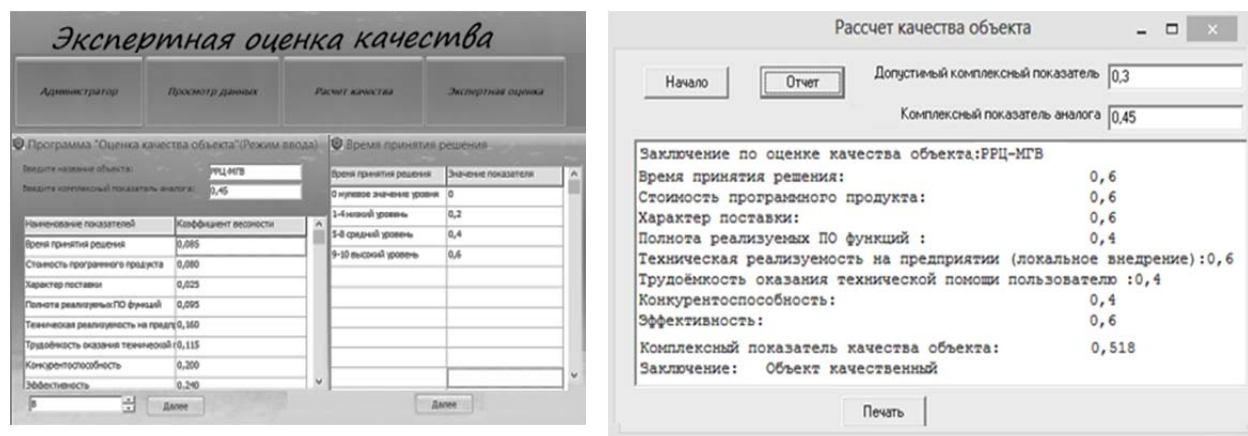


Рисунок 15 – Экспертная оценка качества программы «Расчет размерных цепей – РРЦ»

По оценке экспертной группы разработанный программный продукт дешевле в оснащении технологических и конструкторских рабочих мест и более эффективен в проведении специализированных расчетов, позволяет снизить требования к квалификации технолога и затраты на технологическую подготовку производства.

В приложениях приведены алгоритмы, акты внедрения, результаты экспериментов и экспертного опроса.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены методы размерного анализа изделий при сборке и выявлены шесть методов и четыре способа достижения точности замыкающего звена размерной цепи, формализованный выбор которых предлагается осуществить по шести критериям с установленными диапазонами изменения, из которых три критерия (температура эксплуатации изделия, наличие сил влияния, подвижность соединения) применяются впервые.

2. Для формализации и автоматизации выбора метода достижения точности сборки узлов машин разработана математическая модель на основе логических (булевых) функций, при этом определена логическая таблица, которая связывает критерий, метод достижения точности и параметр его применимости (1 или 0). Разработаны алгоритм и программа для рационального выбора метода сборки, которая легко встраивается в автоматизированный расчет размерных цепей.

3. При совершенствовании метода групповой взаимозаменяемости систематизированы правила и ограничения, на основе которых выведены рекуррентные зависимости, позволяющие формализовать и автоматизировать определение групповых максимальных и минимальных размеров звеньев для многозвенной размерной цепи (число составляющих звеньев $m \geq 3$), на основе которых организуется сортировка и сборка деталей. При этом число составляющих звеньев, сортируемых на группы, не имеет существенного значения.

4. При анализе производственной практики применения селективной сборки выявлены пять типовых задач, когда замыкающим звеном размерной цепи является зазор, и три задачи, когда замыкающее звено – натяг. Для всех типовых задач разработаны рекуррентные зависимости и способы их применения для определения параметров размерной цепи. Разработаны алгоритмы и программа, реализующие разработанные методики.

5. Разработана новая конструкция сборного компенсатора, предназначенного для ступенчатого регулирования зазора между торцами деталей (патент на полезную модель РФ № 112331). Техническим результатом применения разработанного компенсатора являются повышение технологичности конструкции, уменьшение трудоемкости при сборке и возможность многократного использования. Проведены экспериментальные исследования и установлено, что одновременно достигаются повышение (в 1,5...2,2 раза) и стабилизация (в 2...3 раза) жесткости разработанного компенсатора при действии осевой нагрузки по сравнению с компенсатором, составленным из набора колец.

6. Выявлены размерные связи и разработан способ применения сборного компенсатора для регулирования осевого зазора в узлах изделий с подшипниками качения (патент РФ на изобретение № 2592020), собранных с использованием групповой взаимозаменяемости.

7. Определены способы рационального применения разработанного компенсатора для снижения объемов незавершенного производства при сборке методом групповой взаимозаменяемости. При этом рассмотрены два способа применения: включение компенсатора в каждую размерную цепь; применение компенсатора только на этапе образования незавершенного производства путем замены им одной из деталей. Особенностью реализации способов является использование информационного преимущества селективной сборки – информации о действительных размерах звеньев, что позволяет исключить операцию измерения замыкающего звена при сборке и упростить конструкцию компенсатора.

8. Разработан и внедрен в производство АО «Ижевский мотозавод «Акссионхолдинг» программный комплекс – «Расчет размерных цепей – РРЦ» (свидетельство о регистрации программы ЭВМ № 2013616797), основой которого являются разработанные методики определения параметров многозвенных размерных цепей при селективной сборке. Эффективность нового программного продукта подтверждена при его экспертной оценке с использованием разработанной программы (свидетельство о регистрации программы ЭВМ № 2015616730). При внедрении комплекса расширяется область применения метода селективной сборки, уменьшается трудоемкость подготовки производства, снижаются требования к квалификации проектировщика, исключаются субъективные ошибки.

9. При оценке экономического эффекта от применения метода групповой взаимозаменяемости при сборке приспособления для переработки твердых отходов с учетом объема незавершенного производства установлено, что при годовом выпуске изделий $N_{г} = 10000$ шт. экономический эффект составил $\mathcal{E} = 931700$ руб.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Слащев, Е. С. Моделирование метода групповой взаимозаменяемости на координатные оси / В. Г. Осетров, Е. С. Слащев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2012. – № 1 (19). – С. 50–55.

2. Слащев, Е. С. Расчет точности сборки соединений с многозвенной размерной цепью методом групповой взаимозаменяемости / В. Г. Осетров Е. С. Слащев, И. С. Трифанов // Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова. – 2013. – № 1. – С. 19–21.

3. Слащев, Е. С. Совершенствование метода сборки групповой взаимозаменяемости / В. Г. Осетров, Е. С. Слащев // Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова. – 2013. – № 3. – С. 4–6.

4. Слащев, Е. С. Совершенствование расчетов размерной цепи при использовании метода групповой взаимозаменяемости / В. Г. Осетров, Е. С. Слащев // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2014. – № 7. – С. 24–29.

5. Слащев, Е. С. Расчет точности соединений с натягом при использовании метода групповой взаимозаменяемости / В. Г. Осетров, Е. С. Слащев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 2 (24). – С. 52–56.

6. Слащев, Е. С. Выбор метода достижения точности замыкающего звена размерной цепи / В. Г. Осетров, Е. С. Слащев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2016. – № 1 (28). – С. 55–58.

Публикации в других изданиях

7. Слащев, Е. С. Достижение точности при сборке машин методом регулирования с применением подвижных и неподвижных компенсаторов / Е. С. Слащев // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке : сб. ст. науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов и молодых ученых. – Ижевск : ИжГТУ, 2013. – Т 1. – С. 110–116.

8. Слащев, Е. С. Метод сборки механизмов регулированием подвижными и неподвижными компенсаторами / В. Г. Осетров, В. Б. Федоров, Е. С. Слащев / материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. АНТЭ–2011 (г. Казань, 12–14 октября 2011 г.). – Казань : КНИТУ-КАИ, 2011. – Т 1. – С. 519–523.

9. Слащев, Е. С. How to achive precise machine assembling: methog of regulation by using compensators with changeable and fixed shapes / Е. С. Слащев // Communication of Students, Master Students and Post-Graduates in Academic, Professional and Scientific Fields : сб. ст. межвуз. студ. науч. конф. – Ижевск : ИжГТУ, 2011. – С. 270–274.

10. Слащев, Е. С. Компенсаторы непрерывного действия / Е. С. Слащев, В. Г. Осетров // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке : сб. тр. II Всерос. науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием (электронное научное издание). – Ижевск : ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2013. – С. 207–210.

11. Слащев, Е. С. Совершенствование метода групповой взаимозаменяемости при сборке машин / Е. С. Слащев // Инновации в науке, технике и технологиях : сб. ст. Всерос. науч.- практ. конф. – Ижевск : УдГУ, 2014. – С. 244–246.

12. Слащев, Е. С. Оптимизация методов сборки машин. Программа расчета размерных цепей – РРЦ / Е. С. Слащев // Конференция Ижевского радиозавода : сб. ст. науч.-практ. конф. – Ижевск, 2014. – С. 67–76.

13. Слащев, Е. С. Автоматизированная экспертная оценка качества объекта / Е. С. Слащев // Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управление проектами CAD/CAM/CAE/PDM : сб. ст. X Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : Приволжский Дом знаний, 2016. – С. 71–76.

14. Слащев Е. С. Формализация выбора метода достижения точности замыкающего звена при сборке / Е. С. Слащев, В. Г. Осетров // Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управление проектами CAD/CAM/CAE/PDM : сб. ст. XI Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : Приволжский Дом знаний, 2017. – С. 8–14.

Монография

15. Слащев, Е. С. Сборка в машиностроении, приборостроении. Теория технология и организация / В. Г. Осетров, Е. С. Слащев – Ижевск : Изд-во Ижевского института комплексного приборостроения, 2015. – 328 с.

Патенты

16. Пат. 2592020 Российская Федерация, МПК F16B 21/02. Способ регулирования осевого зазора в подшипниках качения / Осетров В. Г., Слащев Е. С. ; патентообладатель ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова». – № 2015105617/12 ; заявл. 18.02.2015 ; опубл. 20.07.2016, Бюл. № 20.

17. Пат. 112331 Российская Федерация, МПК F16L 51/00. Компенсатор / Осетров В. Г., Слащев Е. С. ; патентообладатель ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет». – № 2011121492/28 ; заявл. 27.05.2011 ; опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1.

Свидетельства о регистрации программ ЭВМ

18. Расчет размерных цепей – РРЦ : свидетельство о регистрации программ ЭВМ № 2013616797 от 23.07.2013 / В. Г. Осетров, Е. С. Слащев.

19. Программа для экспертной оценки качества объекта : свидетельство о регистрации программ ЭВМ № 2015616730 от 22.06.2015 / В. Г. Осетров, С. А. Шилиев, А. Д. Армагинов, И. С. Широбоков, Е. С. Слащев.

Научное издание

СЛАЩЕВ Евгений Сергеевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ТОЧНОСТИ СБОРКИ УЗЛОВ МАШИН МЕТОДОМ
ГРУППОВОЙ ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТИ С КОМПЕНСАЦИЕЙ
НЕЗАВЕРШЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

Редактор *В. В. Чувашова*
Технический редактор *Р. Б. Бердникова*
Компьютерная верстка *Р. Б. Бердниковой*

Распоряжение № 11/149-2018 от 09.07.2018.
Подписано в печать 12.07.2018. Формат 60×84¹/₁₆.
Усл. печ. л. 1,27. Заказ № 009594. Тираж 100.

Издательство ПГУ.
440026, Пенза, Красная, 40.
Тел./факс: (8412) 56-47-33; e-mail: iic@pnzgu.ru