

УДК 621.0481

¹Е. Н. Колганова, канд. техн. наук, ²Е. П. Мельникова, д-р техн. наук, проф.,¹В. А. Лебедев, канд. техн. наук, проф., ¹А. П. Шишкина, канд. техн. наук.¹Донской государственный технический университет (ДГТУ), Россия²Донецкий национальный технический университет (ДонНТУ), ДНРТел./Факс: +7 (909) 430-95-99; E-mail: elenkolg@list.ru

РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ

В статье рассмотрены вопросы конструкторско-технологического проектирования сигнализатора протечек теплоносителя (СП) атомных электростанций. Предложено последовательное выполнение операций сборки СП, регламентируемой маршрутной картой единичного технологического процесса. Выполнен анализ требований к технологичности СП. Установлены причины не позволяющие обеспечить выполняемость требований в конструкции СП. Разработан общий алгоритм, включающий в себя ряд взаимообуславливающих функциональных блоков, реализующих процесс проектирования и сборки СП, обеспечивающей требуемое по условиям эксплуатации качество. Предложена модель одноступенчатого размерного анализа.

Ключевые слова: сигнализатор протечек, технологичность, конструкторско-технологическое обеспечение, проектирование

Y. N. Kolganova, E. P. Melnikova, V. A. Lebedev, A. P. Shishkina

DEVELOPMENT OF MEASURES TO IMPROVE THE DESIGN AND TECHNOLOGICAL SUPPORT FOR THE MANUFACTURE OF PRODUCTS

The article deals with the issues of design and technological design of the coolant leak detector (SP) of nuclear power plants. The sequential execution of joint venture assembly operations regulated by the route map of a single technological process is proposed. The analysis of the requirements for the manufacturability of the joint venture is carried out. The reasons that do not allow to ensure the fulfillment of the requirements in the design of the joint venture are established. A general algorithm has been developed that includes a number of mutually reinforcing functional blocks that implement the process of designing and assembling a joint venture that provides the quality required by the operating conditions.

Keywords: duct alarm, manufacturability, design and technological support, design

1. Введение

Эксплуатационные качества машины окончательно формируются в процессе ее сборки. Качество сборки изделия определяется совокупностью большого количества различных показателей, среди которых традиционно доминируют геометрические (точность размеров, геометрической формы, взаимного расположения и контактирования сопрягаемых поверхностей и сборочных элементов, зазоры, натяги и т.д.). Это объясняется тем, что геометрические показатели, кроме того, что важны сами по себе, еще и коррелируют со многими другими параметрами качества машины. Таким образом, работоспособность изделия определяется характером взаимодействия исполнительных поверхностей его деталей, которое принято формализовано отражать в виде взаимосвязей размерных параметров или размерными цепями [4].

При проектировании изделий, эксплуатируемых в условиях повышенного воздействия вибраций разработчик сталкивается с необходимостью обеспечения их виброустойчивости. Наибольшее количество отказов изделий приходится на долю механических

факторов воздействия, поэтому повышение их надежности является важной научно-практической задачей, качество решения которой напрямую зависит от глубины пони-

мания тех механизмов, которые происходят под воздействием вибрационных нагрузок. При воздействии вибрационных нагрузок, имеющих широкий диапазон частот, в изделиях могут возникнуть изгибные, поперечные, продольные и поверхностные волны, которые распространяясь по материалу конструкции, ускоряют процессы разрушения. Даже те элементы изделий, дефекты которых в обычных условиях не проявляются, могут оказаться крайне чувствительными по отношению к слабым вибрациям (точечная сварка и др.) [3].

Технические материалы, на первый взгляд кажущиеся однородными, всегда содержат большое количество дефектов различного происхождения и самых разнообразных размеров. На субмикроскопическом уровне это вакансии включения в почти правильной структуре материала, дислокации, поры. На микроскопическом уровне наблюдается разброс в ориентации, размерах и свойствах частиц, образующих материал. На микроскопическом уровне различны уже свойства материала ввиду неоднородности большого масштаба.

При действии циклически изменяющихся напряжений, создаваемых вибрацией, наблюдается явление усталости материалов. На усталостную прочность материала оказывают существенное влияние два фактора: повторность нагрузки и фактор времени. При циклическом нагружении распространение пластической деформации характеризуется волновым процессом, скорость которого определяется по динамической диаграмме напряжение – деформация. В связи с тем, что пластическая прочность материала понижается по мере увеличения степени деформации, при дальнейшем воздействии циклической знакопеременной нагрузки приведет к образованию субмикроскопических трещинок, расположенных вдоль определенных линий или полос скольжения. Трещины усталости распространяются не по всему объему изделия, подвергающемуся циклическим напряжениям, а только по одному из сечений, в котором она проходит по наиболее слабым элементам материала, в большинстве своем имеющим неоднородную структуру, следовательно, в этом сечении концентрируется наибольшее местное напряжение.

Одной из основных характеристик материала при воздействии на него циклических нагрузок является циклическая вязкость, которая не является постоянной величиной, так как зависит от величины циклических напряжений и от нарастания числа циклов напряжения; эти изменения циклической вязкости, характеризуемые изменением петли гистерезиса, позволяют констатировать в металле под действием циклических нагрузок наличие одновременно протекающих двух факторов: фактора упрочнения, за который принимается наклеп и механическое старение материала, вызываемые его пластической деформацией; разупрочняющего фактора, за который принимаются остаточные напряжения в материале.

Ход всякого усталостного процесса материала зависит от сравнительной интенсивности обоих факторов, меняющихся по мере нарастания числа циклов нагружения и их частоты. Степень влияния частоты нагружения на характеристики усталостной прочности материала зависит от материала, характера нагружения, уровня напряжений (отношения максимального напряжения цикла к пределу упругости), наличия концентраций напряжения, окружающей среды, температуры.

Происходящие под воздействие вибраций в материалах элементов изделия структурно фазовые преобразования, приводящие к изменению их напряженного состояния, определяют снижение надежности, нарушению геометрической точности изделий и, как следствие, к утрате их функциональных функций. В настоящее время вопрос взаимосвязи качества изделий с их эксплуатационными свойствами и, в частно-

сти, с обеспечением вибростойкости не получил должного разрешения. Поэтому задача учета этих факторов на стадии конструкторско-технологической проработки изделий, эксплуатируемых в условиях повышенного воздействия, является актуальной, имеющей важное научное и практическое значение для повышения их работоспособности.

2. Основное содержание и результаты работы

Сборка – завершающий, трудоемкий и дорогостоящий технологический процесс, во многом определяющий эксплуатационные характеристики, себестоимость изготовления и конкурентоспособность любого изделия, а тем более электромеханических датчиков. Проблема улучшения качества выпускаемых изделий, снижения затрат на их изготовление и сокращения сроков подготовки серийного производства особенно актуально проявляется на современном этапе развития приборостроения. Необходимость обеспечения постоянной конкурентоспособности на насыщенном мировом рынке диктует частую смену продукции данной отрасли. Это требует разработки и применения самых современных технологических процессов сборки, наиболее совершенного оборудования и оснастки, жесткого сквозного контроля, рационального решения вопросов обеспечения точности и взаимозаменяемости при непрерывно сокращаемых сроках подготовки производства новых изделий [3, 4].

Целью исследований является разработка технологических принципов и расчётных моделей, обеспечивающих на этапе проектирования и изготовления вибростойкость электромеханических датчиков и выработка на этой основе рекомендаций по внедрению их в конструкторско-технологическую практику.

Для достижения поставленной цели рассмотрим процесс проектирования сигнализатора протечек теплоносителя (СП) атомных электростанций. Сигнализатор протечек, является элементом, обеспечивающим нормальную, безопасную эксплуатацию реактора в экстремальных условиях, и предназначен для контроля протечек теплоносителя в узлах уплотнения фланцевых разъёмов блока верхнего реактора.

Изготовление СП регламентируется маршрутной картой единичного технологического процесса общей сборки, предусматривающей последовательное выполнение следующих операций:

1. Сборка и регулировка подвижного контакта;
2. Соединение сваркой корпуса в сборе с подвижным контактом, мембраной и стаканом;
3. Гидроиспытание сварного шва и контроль его герметичности;
4. Сборка корпуса неподвижного контакта;
5. Установка неподвижного контакта в корпус СП и его фиксация в требуемом положении, установленном ТУ;
6. Испытания СП на работоспособность.

Не раскрывая детали содержания операций, прописанных в технологическом регламенте, следует отметить ряд основных факторов, свидетельствующих о их неэффективности. Во-первых, несмотря на общий регламент изготовления, для каждого изделия требуется индивидуальный подход при выполнении пригоночно - регулировочных работ. Во-вторых, следует отметить не проработанность вопросов фиксации ряда деталей в изделии, определяющих надёжность работы изделия при эксплуатации.

В основном, детали сигнализатора относятся к телам вращения с осевым отверстием, в которое входит сопрягаемая деталь (втулка). Основным техническим требованием при изготовлении деталей данного типа является концентричность наружных и внутренних поверхностей и перпендикулярность одной или обеих

торцовых поверхностей втулки ее оси. Детали имеют наружную ступенчатую поверхность, наружные и внутренние поверхности - цилиндрические.

Детали: корпус, вкладыш и корпус контакта изготавливаются из жаропрочного сплава ХН35ВТ-ВД. Детали: стакан, толкатель, пробка и чашка производятся из коррозионностойкой жаропрочной стали 08Х18Н10Т. Данные сплавы применяются для изготовления деталей и узлов основного оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок с водяным теплоносителем. Сталь 08Х18Н10Т отличается хорошей свариваемостью, а, в свою очередь, сплав ХН35ВТ-ВД относится к трудносвариваемым. Таким образом, данные сплавы подходят для условий работы сигнализатора протечек теплоносителя.

Размерный анализ является важным этапом в процессе подготовки производства к выпуску новой продукции. Он позволяет обеспечить требуемую точность функциональных параметров изделий. При этом размерный анализ является связующим звеном между конструкторскими и технологическими работами. При проектировании устанавливаются и закладываются в конструкции взаимосвязи между параметрами качества изделия с одной стороны и эксплуатационными характеристиками и параметрами самой конструкции с другой. Задачей технолога является реализация разработанных требований конструктора при изготовлении машины с учетом критерия минимальной себестоимости.

При эксплуатации размерные связи не остаются постоянными. На изделие будут воздействовать внешние и внутренние факторы, которые приводят к потере точности. Такие воздействия необходимо учитывать при комплексном обеспечении точности в виде эксплуатационных размеров, которые описывают дополнительные размерные связи, возникающие при эксплуатации изделия. Включение эксплуатационных размеров в конструкторские размерные цепи позволяет обеспечивать требуемую точность функциональных параметров в течение заданной долговечности изделия.

На рис. 1-4 приведены размерные связи, обеспечивающие выполнение СП своего функционального назначения с учётом рекомендуемых конструктивных изменений, которые могут быть положены в основу традиционного размерного анализа.

Проведение традиционного размерного анализа позволяет добиться требуемой точности при изготовлении детали. Однако без учета эксплуатационных процессов нельзя обеспечить точность изделия в течение заданной долговечности. Поэтому важным при проведении размерного анализа конструкций машин представляется учет износа и деформаций (контактных, тепловых, статических) составляющих звеньев и влияние этих и других эксплуатационных явлений на точность исходного (замыкающего) звена.

Предметом оценки конструкции СП на технологичность в соответствии с техническим заданием на выполнение работ, являлась его производственная технологичность. Анализ конструкции СП на технологичность проводился в соответствии с ГОСТ 14.201-83 «Технологичность конструкции. Термины и определения», ГОСТ 2.116-84*, ГОСТ 14.205-83 «Правила обеспечения технологичности конструкции изделия», который позволил установить следующее.

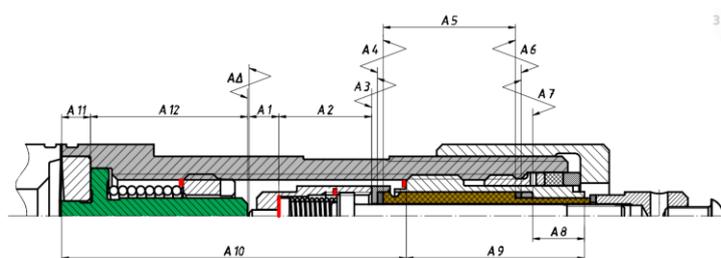


Рисунок 1. Схема размерной цепи **А**, обеспечивающей при сборке достижение точности зазора между исполнительными поверхностями СП

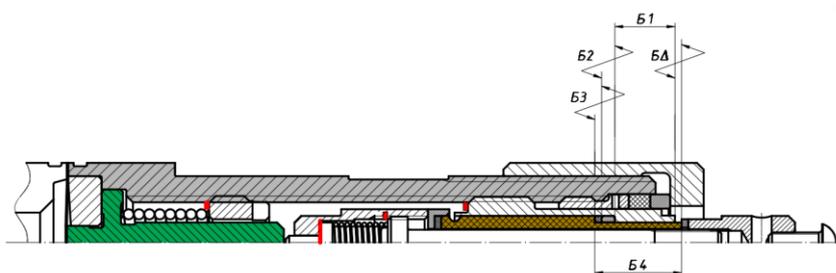


Рисунок 2. Схема размерной цепи **Б**, обеспечивающей при сборке СП достижение точности выступа изолятора за пределы его корпуса

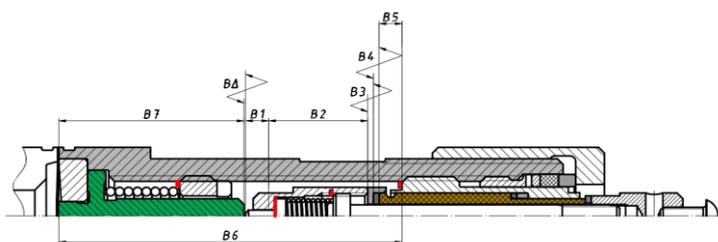


Рисунок 3. Вариант схемы размерной цепи **В**, обеспечивающей при сборке достижение точности зазора между исполнительными поверхностями СП

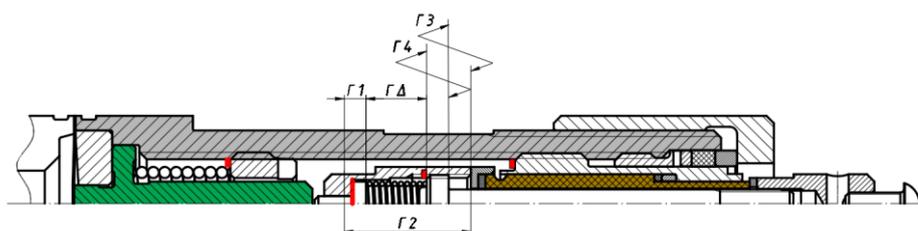


Рисунок 4. Схема размерной цепи **Г**, обеспечивающей расчет точности упруго элемента неподвижного контакта СП

В качестве очевидных преимуществ СП, определяющих его технологичность, можно выделить:

- простоту формы СП и входящих в него деталей - все они являются телами вращения, что позволяет их изготовить на станках токарной группы нормальной точности;
- наличие базовой детали, роль которой выполняет корпус;
- простоту ориентации деталей относительно друг друга;

Таблица 1. – Анализ требований к технологичности СП

Требования к технологичности конструкции	Причины не позволяющие обеспечить выполняемость требований в конструкции СП
Требования к составу СЕ	
Обеспечение сборки без применения регулировочных и пригоночных работ	Требования КД и технологического регламента изготовления СП
Удобный доступ к местам сборки, контроля, регулировки и пригонки	Конструктивные особенности СП
Простота компенсирующих устройств и удобство пользования ими	В конструкции СП отсутствуют
Проведение сборки и регулировки без промежуточной разборки и повторных сборок составных частей	Технологический регламент изготовления СП
Использование конструкторских баз в качестве технологических и измерительных	Технологический регламент изготовления СП
Взаимозаменяемость	Индивидуальный подход при настройке СП, разная точность деталей
Регулируемость конструкции	На этапе эксплуатации не возможна
Контролепригодность конструкции при эксплуатации	На этапе эксплуатации не возможна
Инструментальная доступность конструкции	Конструктивные особенности СП
Возможность компоновки из стандартных и унифицированных деталей	Все детали специальные
Компоновка сборочной единицы обеспечивается общей сборкой без промежуточной разборки и повторных сборок составных частей;	Технологический регламент изготовления СП
Наличие устройств, обеспечивающие заданную точность относительного расположения составных частей (центрирующие, фиксирующие, компенсирующие)	Технологическим регламентом не предусмотрены
Пределы регулирования и параметры компенсаторов рассчитываются на основе теории размерных цепей.	Технологический регламент изготовления СП не предусматривает
Требования к сопряжениям деталей СЕ	
Потребность в специальных приспособлениях для осуществления соединений (сжатие тугих пружин, запрессовка, развальцовка и т.д.) должна быть сведена к минимуму	Технологический регламент изготовления СП
Соединения не должны требовать дополнительной обработки в процессе сборки	Технологический регламент изготовления СП
В прессовых соединениях длина запрессовки должна быть минимальной	Прессовые соединения отсутствуют
Сборка деталей по двум посадочным поверхностям должна быть не одновременной, а последовательной	Подобного типа соединения отсутствуют
Желательно, чтобы способ стопорения был не трудоемким и допускал разборку и повторную сборку соединения	Технологический регламент изготовления СП

- отсутствие высокой точной обработки сопрягаемых поверхностей соединения составных частей;

- возможность расчленения на составляющие СЕ;

- преобладание подвижных, разъемных соединений;

- контролепригодность на этапе изготовления;
- точность и шероховатость сопрягаемых поверхностей соответствуют требуемой прочности неподвижных и износостойкости подвижных соединений;
- до окончания процесса сборки детали фиксируются относительно друг друга без дополнительного крепления.

Вместе с тем, как представлено в табл. 1, по ряду факторов конструктивное исполнение СП не обеспечивает выполнение требований к технологичности, предусмотренными вышеуказанными ГОСТами.

Наличие более 50% нереализованных требований к технологичности конструкции СП показывает, что конструктивное исполнение нуждается в совершенствовании и улучшении, особенно в части мероприятий, направленных на снижение уровня работ, связанных с пригонкой и регулировкой. Это особенно важно при организации серийного выпуска СП.

Особую сложность вызывают испытания СП на виброустойчивость из-за отсутствия технических средств, обеспечивающих показатели, установленных к нему техническими требованиями [1, 2]. В этой связи, вполне успешно, с достаточно высокой степенью достоверности, может быть использована, в частности, программа компьютерного моделирования Creo Simulate, предназначенная для решения широкого круга задач методом конечных элементов, и позволяющая численно исследовать вибрационный и ударный отклик деталей СП [5, 6]. Весь процесс решения задачи вибрационного анализа СП в программе Creo Simulate можно разделить на несколько этапов: подготовка расчетной модели, настройка взаимосвязи элементов модели, задание свойств материалов и граничных условий (ограничений и нагрузок), генерация сетки, разрешающей характерные масштабы колебаний, расчет проекта и постобработка результатов. После проведения анализа и выявления проблемных областей возможно, на основе вероятных решений, внести необходимые изменения в конструкцию изделия, и снова запустить анализ для дополнительного моделирования и определения результативности принятых решений.

3. Общий алгоритм и рекомендации

Выполненные исследования позволили разработать общий алгоритм, включающий в себя ряд взаимообуславливающих функциональных блоков (рис.5), реализующих процесс проектирования и сборки СП, обеспечивающей требуемое по условиям эксплуатации качество.

Осуществление рекомендуемой технологической схемы сборки СП предполагает: на общую сборку входящие в состав изделия СЕ поступают полностью собранными и проверенными; конструкция СЕ не допускает их частичную разборку и регулировку на базовой детали

Для обеспечения этого условия рекомендуется:

1. Расчет точности деталей СП, подлежащих изготовлению и обеспечивающих его функциональное назначение, провести с использованием размерного-точностного анализа, реализующего проектирование, а также устанавливающего связь эксплуатационных параметров и технологии изготовления;

2. Для оценки виброустойчивости СП в экстремальных условиях эксплуатации применить программный пакет компьютерного моделирования Creo Simulate.

Применяя теорию размерного анализа конструкций, можно связать ряд этапов конструкторско-технологической подготовки изготовления изделия. На рис. 6 приведена блок-схема обеспечения точности изделия в процессе конструкторско-технологической подготовки производства.

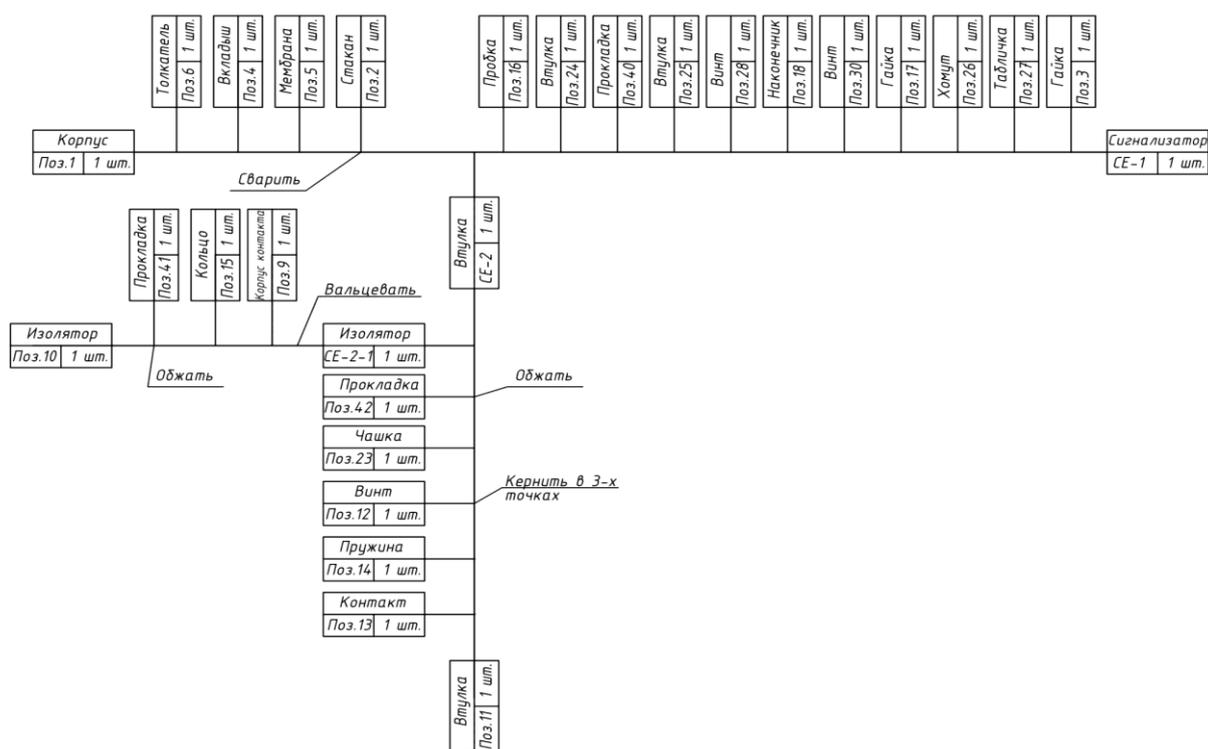


Рисунок 5. Технологическая схема общей сборки СП

В качестве основных этапов управления точностью изделия выделяют следующие: анализ требований, предъявляемых к изделию, и определение параметров замыкающих звеньев; построение размерных цепей, формирующих необходимые замыкающие (исходные) звенья; предварительная оценка сложности обеспечения требуемой точности замыкающего звена; выбор метода обеспечения точности замыкающего звена; анализ конструкторских размеров с заменой наиболее ответственных или сложных в изготовлении на соответствующие технологические размеры; анализ функционального назначения деталей и их отдельных поверхностей с добавлением необходимых эксплуатационных звеньев; решение построенной размерной схемы и определение всех параметров и мероприятий, необходимых для изготовления и эксплуатации изделия в течение требуемого срока службы.

Любой размер определяет положение одних деталей относительно других деталей (элементов технологической оснастки) или относительное положение различных поверхностей одной и той же детали. В результате в общем виде размер изделия можно представить в виде системы исходных размеров.

$$A_{\text{факт}} = \sum S + \sum \Delta_{\text{изг}} + \sum I_{\text{экс}} \tag{1}$$

где $A_{\text{факт}}$ - конструкторские размеры; $\sum S$ - система технологических размеров, определяемая схемами базирования на технологических операциях в процессе изготовления детали (настроечный размер); $\sum \Delta_{\text{изг}}$ - элементарные погрешности изготовления; $\sum I_{\text{экс}}$ - погрешности, появляющиеся при эксплуатации машины.

Предложенная модель одноступенчатого размерного анализа позволяет реализовать процесс обеспечения заданной точности изделия путем комплексного расчета

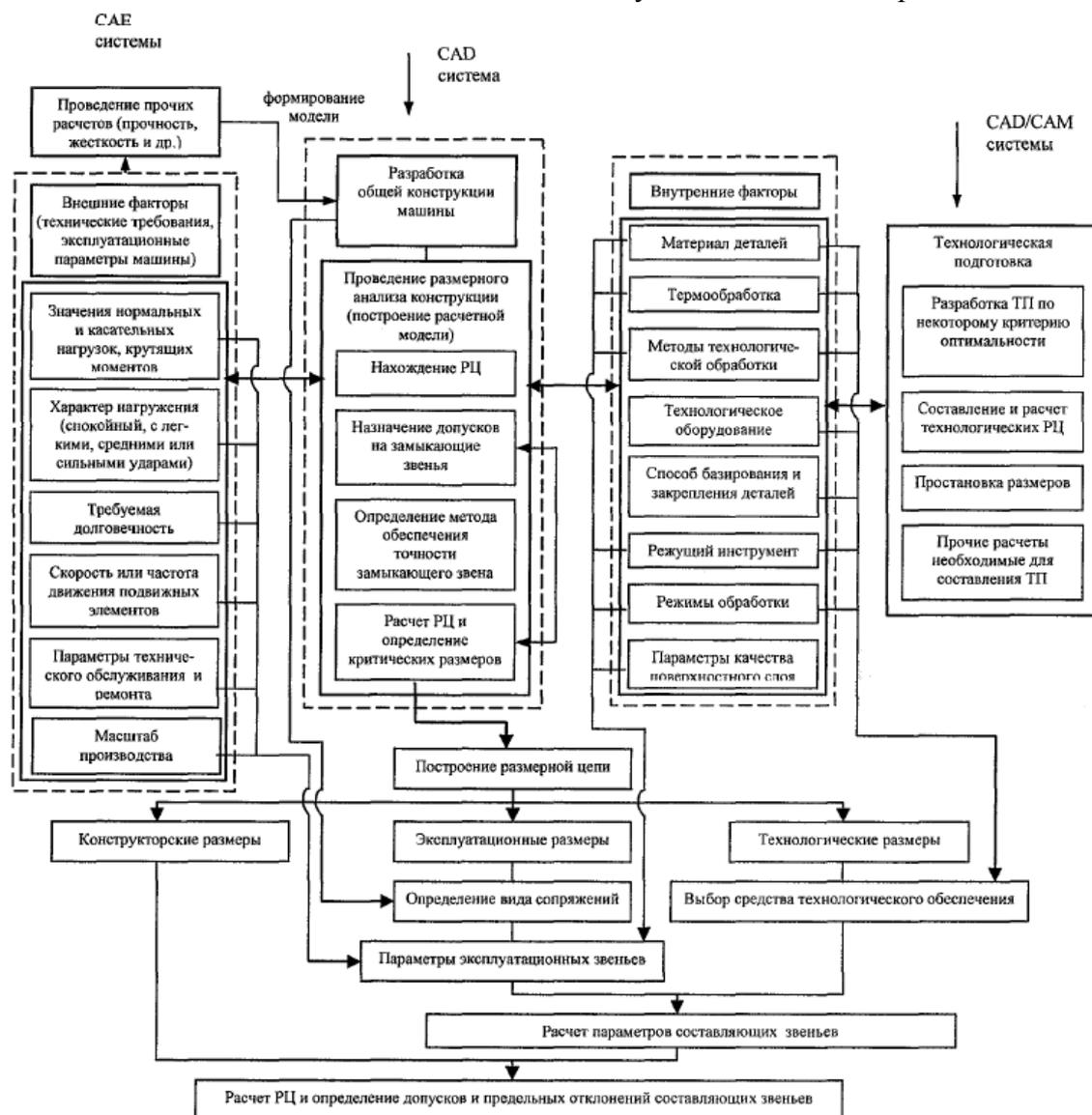


Рисунок 6. Обеспечение точности изделия в процессе конструкторско-технологической подготовки производства

размерных связей с учетом обеспечения требуемой работоспособности изделия (точность замыкающего звена сборочной размерной цепи), условий его эксплуатации, а также учетом проектируемой технологии изготовления и сборки (выбор технологических баз и расчет точности межоперационных размеров, учет погрешностей обработки).

Модель позволяет проводить расчет точности функциональных размеров отдельных конструктивных элементов деталей с анализом отклонений формы и расположения контактирующих поверхностей, изменения размеров при эксплуатации (износ, контактные деформации, вибрации и др.), а проектирование операционных размеров увязывается с типом применяемого оборудования (универсальное, копировальное, с ЧПУ и др.).

Рассмотренная общая модель является основой для проведения размерно-точностного анализа изготовления СП с учетом его функционального назначения и условий эксплуатации с применением компьютерного моделирования.

4. Заключение

Таким образом, выполненные исследования позволили реализовать следующее:

1. Выполнить анализ требований к технологичности СП. Установить причины, не позволяющие обеспечить выполняемость требований в конструкции СП.

2. Разработать общий алгоритм, включающий в себя ряд взаимообуславливающих функциональных блоков, реализующих процесс проектирования и сборки СП, обеспечивающий требуемое по условиям эксплуатации качество.

3. Предложить модель одноступенчатого размерного анализа.

Результаты проведенных исследований и предложенные для практического применения мероприятия позволяют улучшить конструкторско-технологического обеспечение изготовления сигнализатора протечек теплоносителя атомных электростанций.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Колганова, Е. Н. Технологическое обеспечение вибрационной обработки деталей, имеющих малые пазы и отверстия [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 2.5.6 (05.02.08) Технология машиностроения / Е.Н. Колганова. – Ростов н/Д, 2022. – 169 с.

2. Повышение эффективности вибрационной обработки путем комбинирования обрабатываемых сред / М. А. Тамаркин, Е. Н. Колганова, Ю. В. Корольков, В. М. Троицкий // Научные технологии в машиностроении. – 2021. – № 6(120). – С. 12-17. – DOI 10.30987/2223-4608-2021-6-12-17. – EDN VTCTWS.

3. Польский, Е. А. Технологическое обеспечение точности и качества поверхностей деталей машин при проектировании маршрутно-операционного технологического процесса методом синтеза на основе анализа размерных связей / Е. А. Польский // Научные технологии в машиностроении. – 2016. – №10 (64). – С. 39 – 48.

4. Суслов, А. Г. Научная технология повышения качества сборочных единиц машин на этапах жизненного цикла / Суслов А. Г., Федонин О. Н., Польский Е. А. // Научные технологии в машиностроении. – 2016. – №5 (59). – С. 34 – 42.

5. Тамаркин, М. А. Обоснование гранулометрических характеристик рабочей среды при вибрационной обработке деталей с малыми пазами и отверстиями. / Тамаркин М. А., Колганова Е. Н., Ягмуров М. А. // Advanced Engineering Research. – 2020. – 20(4). – С. 382-389.

6. Эффективность применения гранулированных сред из природных материалов для виброотделки деталей радиоэлектронной аппаратуры / М. А. Тамаркин, Е. Н. Колганова, В. А. Лебедев, А. П. Шишкина // Воронежский научно-технический Вестник. – 2021. – Т. 4. – № 4(38). – С. 59-69. – DOI 10.34220/2311-8873-2022-59-69. – EDN LTQYNQ.

Поступила в редколлегию 22.03.2023 г.