

На правах рукописи



ХА ВАН ЧЬЕН

**ФОРМИРОВАНИЕ СХЕМЫ БАЗИРОВАНИЯ ПРИ
РАЗРАБОТКЕ ОСНАСТКИ ДЛЯ СБОРКИ УЗЛОВ ИЗ
МАЛОЖЁСТКИХ ДЕТАЛЕЙ**

Специальность 05.02.08 – «Технология машиностроения»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2014

Работа выполнена на кафедре «Самолётостроение и эксплуатация авиационной техники» ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Ахатов Рашид Хадиятович**,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный
технический университет»

Официальные оппоненты: **Громашев Андрей Геннадьевич**,
доктор технических наук, главный технолог ЗАО
«Аэрокомпозит»

Березин Сергей Яковлевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Забайкальский государственный
университет»

Ведущая организация: ОАО «Иркутский научно-исследовательский институт авиационных технологий и организации производства»

Защита состоится «30» октября 2014 года в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.073.02 при Иркутском государственном техническом университете по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, корпус «К», конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный технический университет», с авторефератом – на официальном сайте университета www.istu.edu.

Автореферат разослан «25» сентября 2014 года.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, подписанные и заверенные печатью организации, просим выслать по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ИрГТУ, учёному секретарю Диссертационного Совета Д 212.073.02 В.М. Салову, тел. (3952) 40-51-17, salov@istu.edu.

Учёный секретарь
диссертационного совета, к.т.н.,
профессор



В.М. Салов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Экономическая мощь государства определяется совершенством и инновационным развитием базовых отраслей экономики, а к числу базовых отраслей экономики любого государства относится машиностроение. Сборочные процессы в машиностроении – это заключительная часть производства новых изделий и от их совершенства зависит качество производимой продукции.

Современное машиностроение характеризуется повышением требований к качеству изделий, увеличением их сложности при одновременном требовании сокращения цикла производства и снижения себестоимости продукции. Для обеспечения высокой точности сборки таких изделий требуется сборочная оснастка, что приводит к увеличению трудоёмкости и длительности цикла технологической подготовки производства.

Областью технологии машиностроения как науки о сущности процессов производства является технология самолётостроения. Конструкция планера самолёта отличается сложностью конструкции, большим количеством маложёстких деталей и сравнительно высокими требованиями к точности сборки при значительных габаритах изделия. При этом очень важной проблемой является повышение качества сборочной оснастки при снижении трудоёмкости её проектирования.

На сегодняшний день, выбор состава сборочных баз основывается на анализе типовых технологических процессов, которые концентрируют опыт технолога. Таким образом, качество принятия решений зависит от опыта технолога. Эти методы слабо формализованы, они удобны для человека, но не удобны для автоматизированного проектирования.

В современных условиях необходимо разрабатывать новые технологические процессы сборки, с применением современных информационных технологий и автоматизированного оборудования. Автоматизация сборочных процессов возможна только на основе комплексного использования математических моделей всех объектов производства: изделия, технологических процессов, инструментов и технологического оборудования. Поэтому проблема выбора и согласования сборочных баз всех объектов производства на весь период выполнения сборочных работ является особенно актуальной для самолётостроения.

Цель и задачи исследования. Разработка методики формализованного автоматизированного выбора состава сборочных баз и схем базирования на основе CAD модели изделия и данных PDM системы.

Данная цель достигается путём решения следующих задач:

- 1) разработать методику анализа геометрических характеристик изделия непосредственно по его электронному макету, построенному в принятой CAD системе, для построения дискретных математических моделей маложёстких деталей сборочной единицы;
- 2) на основе дискретной математической модели маложёсткой детали выявить минимальный состав базовых точек, определяющих ее основные базы с учетом задания ограничивающих связей, позволяющих за-

дать ее пространственное положение, удовлетворяющее условию допустимых деформаций;

- 3) выбрать внешние базирующие элементы сборочного приспособления, базы которых соответствуют выявленному составу основных сборочных баз устанавливаемой маложесткой детали;
- 4) выбрать фиксирующие элементы сборочного приспособления, установочные базы которых задают необходимые ограничивающие связи на пространственное положение маложесткой детали;
- 5) реализовать систему автоматизированного проектирования элементов сборочного приспособления.

Объектом исследования. Состав сборочных баз для маложестких изделий в наукоемком машиностроении.

Предметом исследования. Формализованная методика построения дискретных математических моделей маложестких деталей сборочной единицы на основе их CAD моделей и данных PDM системы для автоматизированного выбора состава их сборочных баз и схем базирования.

Методы исследования. В качестве общей методологической основы использован системный подход, заключающийся в анализе закономерностей выбора состава сборочных баз изделий, и исследовании способов математического описания сборочных баз, а так же математических методов их анализа. При выполнении работы использовались положения технологии сборки в машиностроении и самолётостроении, теории множеств, теории графов, алгебры логики и аналитической геометрии.

Научная новизна:

- 1) предложена методика выбора элементарной поверхности на детали в зоне сопряжения ее с другой деталью сборочной единицы, дифференциально-геометрические свойства всех точек которой признаются равными в пределах удовлетворения принятым критериям;
- 2) разработана методика анализа и выбора ограничивающих связей на взаимное расположение сопрягаемых деталей сборочной единицы на основе анализа дифференциально-геометрических характеристик локальных зон их поверхностей сопряжения;
- 3) разработана методика построения дискретной математической модели маложесткой детали сборочной единицы на основе определения базовых точек на ее поверхности, задающих основные базы необходимые и достаточные для полного ограничения всех степеней свободы;
- 4) разработан алгоритм определения состава базирующих элементов сборочного приспособления, использующий дискретную математическую модель маложесткой детали сборочной единицы.

Практическая значимость работы:

- 1) снижение влияния субъективного фактора при принятии решений в ходе автоматизированной сборки маложестких деталей, благодаря использованию выявленных формальных критериев выбора состава сборочных баз;

- 2) сокращение цикла технологической подготовки производства и повышение качества проектных решений за счет использования формализованных алгоритмов определения состава сборочных баз и построения автоматизированной системы установки базирующих элементов сборочного приспособления;
- 3) математическая модель реализована в информационной среде предприятия внедрения, включающей базовую CAD/CAM/CAE систему NX 7.5 Siemens PLM Software, а также средства программного расширения NX/Open API, среду программирования C++ с сохранением данных в СУБД Oracle;
- 4) предложен математический аппарат, применимый для решения ряда задач технологической подготовки сборочного производства:
 - выбор состава сборочных баз изделия;
 - выбор состава базирующих элементов сборочной оснастки.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) классификаторы поверхностей сопряжения и база знаний экспертной системы для автоматизированного анализа степеней свободы деталей сборочной единицы непосредственно по КЭМ изделия;
- 2) классификаторы типовых деталей конструкции планера самолета для анализа относительной жесткости СЕ при сборке;
- 3) методика построения дискретных математических моделей мало жестких деталей сборочной единицы на основе автоматизированного выбора сборочных баз с использованием метода анализа конструкции непосредственно по КЭМ изделия, основанного на сравнении текущей деформации пакетов деталей в зоне выбора базовых точек с допустимыми значениями;
- 4) алгоритм выбора состава базирующих элементов сборочной оснастки для сборки конкретной сборочной единицы;
- 5) методику автоматизированного проектирования элементов сборочного приспособления по принятой модели базирования.

Реализация работы. Диссертационная работа выполнена в рамках НИР №334/10 «Разработка и внедрение высокоэффективных технологий проектирования, конструкторско-технологической подготовки и изготовления самолета МС-21», тема по дополнительному соглашению №4 «Система автоматизированного проектирования сборочной оснастки с использованием экспертных систем» (06.10.2010 г. – 31.12.2012 гг.), а также № 389/12 «Автоматизация и повышение эффективности процессов изготовления и подготовки производства изделий авиатехники нового поколения на базе Научно-производственной корпорации «Иркут» с научным сопровождением Иркутского государственного технического университета», тема по дополнительному соглашению №12 «Разработка подсистемы поддержки принятия решений в системе автоматизированного проектирования объектов сборочного производства» (15.11.2012 г. – по настоящее время).

Результаты работы использованы при выполнении НИРС и в учебном процессе кафедры «Самолётостроение и эксплуатация авиационной техники»

Иркутского государственного технического университета в виде лекций и лабораторных работ по дисциплинам «Проектирование сборочных приспособлений», «Автоматизация проектно-конструкторских работ и технологических процессов» и «Технология производства самолетов». Имеется один акт внедрения в ИрГТУ.

Апробация работы. Диссертация прошла апробацию на конференциях и семинарах кафедры «Самолетостроение и эксплуатация авиационной техники» Иркутского государственного технического университета, на Всероссийской научно-технической конференции «Новые материалы и технологии-НМТ-2012» в 2012 г. (МАТИ, г. Москва), на научно-технических конференциях Факультета транспортных систем ИрГТУ в 2012-2013 гг. (ИрГТУ, г. Иркутск), на Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона» (НПО-2013) в 2013 г. (НГТУ, г. Новосибирск), на всероссийском научно-практическом семинаре «Высокоэффективные технологии проектирования, конструкторско-технологической подготовки и изготовления самолетов» в 2013 г. (Иркутский авиационный завод, г. Иркутск), на международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы развития науки» (14 февраль 2014 г, г. Уфа).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 11 научных работ, из них 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, а также 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Личный вклад: Все выносимые на защиту результаты получены лично автором или при его непосредственном участии.

Структура и объём работы. Настоящая работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений. Основное содержание диссертации насчитывает 147 страниц, содержит 5 таблиц, 50 рисунков, библиографии 111 наименований, копия 1 свидетельства, копия 1 акта внедрения. Общий объём работы 149 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана общая характеристика работы и обоснована ее актуальность, на основании чего сформулированы цель и задачи исследований, определены научная новизна, практическая значимость выполненных исследований, выявлены объект исследования и предмет исследования, определены основные методы исследования поставленных задач, излагается краткое содержание работы по главам.

В **первой главе** рассмотрены существующие методы определения схемы базирования для изделий из маложестких деталей на основании действующих стандартов и работ А.И. Бабушкина, В.П. Григорьева, Ш.Ф. Ганиханова, В.В. Бойцова, В.А. Барвинка, А.И. Пекарша, К.А. Однокурцева, П.Е.Чимитова и других ученых. Дано определение маложесткой детали, под которой понимается конструкция, которая при свободном размещении на опорной поверхности способна деформироваться под собственным весом так, что величина этой деформации превышает допустимое значение.

Приведен краткий обзор литературы, где рассмотрены существующие математические модели и методы, разработанные В.В. Павловым, Т.А. Сагдиевым, О.С. Самсоновым, А.Г. Громашевым, Ю.М. Соломенцевым, Н.М. Капустиним, П.Е.Чимитовым и др. для выбора состава сборочных баз и типовых элементов сборочной оснастки. В них используется математический аппарат теории множеств, теории графов и алгебры логики. Однако использование известных методик при подготовке математической модели по табличным классификаторам требует непосредственного участия инженера-технолога. Рассмотрены существующие математические модели и методы, предложенные Б.С. Балакшиным, Б.М. Базровым, Д.А. Журавлёвым, Б.П. Сандалики, А.В. Скворцовым, В.В. Кузьминым, Ю.Л. Шурыгиным, К.А. Однокурцевым, для описания сборочных баз с допусками, выбора сборочных размерных цепей и расчёта пространственных допусков. Однако рассмотренные модели основаны на ручной подготовке данных, что требует специализированной подготовки персонала и увеличивает цикл ТПП.

Проведен анализ возможности применения современных САПР при проектировании конструкции сборочной оснастки и технологических процессов сборки изделий. В них автоматизировано большинство рутинных операций, что позволяет выполнять разработку типовой сборочной оснастки в диалоговом режиме. Однако, подготовка расчётных моделей и принятие решений, в особенности на начальных этапах технологического проектирования, требует непосредственного участия высококвалифицированных технолога и конструктора оснастки.

По результатам выполненного выше обзора сформулирована цель и задачи исследования, заключающиеся в разработке формализованного автоматизированного выбора состава сборочных баз и схем базирования.

Во **второй главе** рассматриваются вопросы, связанные с разработкой математического представления состава основных баз сборочной единицы с использованием электронного макета конструкции, построенного в САД системе.

Вначале изложена задача и методика исследования при анализе основных баз сборочной единицы. В общем случае в машиностроении деталь рассматривается как твёрдое тело, имеющее шесть степеней свободы: три поступательные и три вращательные, заданные по осям прямоугольной системы координат. Ограничение каждой степени свободы исключает возможность перемещения или поворота детали относительно данной оси в обоих направлениях. Они описаны булевыми векторами $B_{\alpha j}$. В общем случае степень фиксации B положения твердого тела относительно некоторой координатной системы может быть описана формулой:

$$B = \bigcup_{\alpha=1}^2 \left(\bigcup_{j=1}^6 B_{\alpha j} \right), \quad (1)$$

где $B_{\alpha j}$ – значение свойства: «тело обладает α -й степенью свободы относительно j -й оси координат»;

α – вид перемещения, α принимает значения 1 и 2 соответственно для поступательного и вращательного движения;

j – номер оси координат: $j=1\div 6$;

$B_{\alpha j}=1$ если тело обладает возможностью α – го перемещения вдоль (вокруг) j -й оси координат. В противном случае $B_{\alpha j}=0$.

Для каждой пары сопрягаемых деталей сборочной единицы поверхность сопряжения совпадает с поверхностями контакта общих тел. В самом общем виде сопряжение двух тел происходит по криволинейной поверхности. Число степеней свободы рассматриваемых деталей сборочной единицы зависит от наличия или отсутствия ограничений на перемещение поверхности сопряжения относительно некоторой оси j , или зависит от направления нормали к поверхности сопряжения и оси j и кривизны поверхности сопряжения по этой оси.

Для анализа степени фиксации введено понятие поверхности сопряжения между сборочными единицами изделия – двумерного многообразия в пространстве, точки которого принадлежат одновременно поверхностям рассматриваемой детали и сопрягаемой с ней детали изделия либо элемента сборочного приспособления:

$$P_{C\delta i} = P_{\Pi 1} \cap P_{\Pi 2}, \quad (2)$$

где $P_{C\delta i}$ – множество точек поверхности сопряжения;

$P_{\Pi 1}$ – множество точек поверхности рассматриваемой детали изделия;

$P_{\Pi 2}$ – множество точек поверхности сопрягаемой детали изделия или базисующего элемента сборочного приспособления.

Принципиальная схема анализа геометрической формы сборочной единицы и их влияние на условие фиксации показана на рисунке 1.

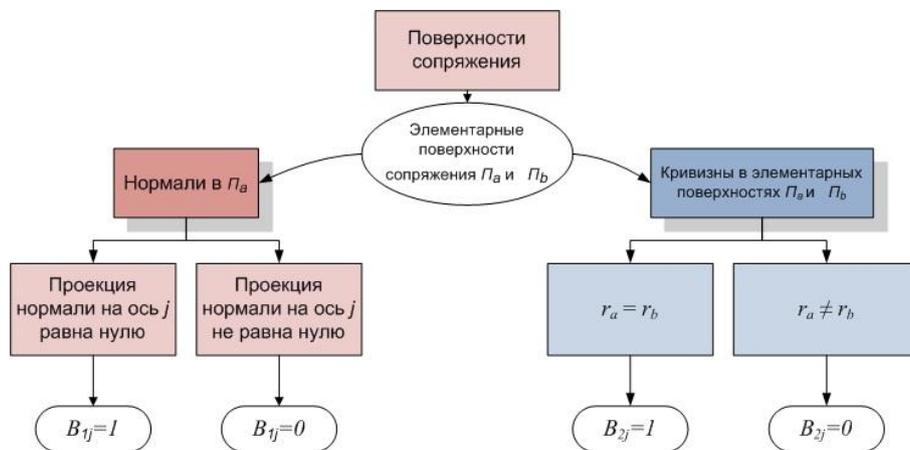


Рисунок 1 – Алгоритм определения состава основных баз

Поверхность сопряжения разбивается на элементарные поверхности так, что на каждой элементарной поверхности можно выбрать одну опорную точку контакта, дифференциальные свойства которой будут аналогичны свойствам остального множества точек этой элементарной поверхности по принятым критериям. Для геометрических свойств поверхности критерием аналогичности (близости) принимаем равенство всех дифференциально-геометрических характеристик поверхности в каждой точке с допустимой величиной отклонения.

Для каждой элементарной поверхности сопряжения определяются условия выполнения ограничений на перемещения по всем координатным направ-

лениям по методу анализа расположения нормали к поверхности сопряжения и кривизны этих элементарных поверхностей.

По анализу получаем что, если во всех опорных точках элементарных поверхностей сопряжения существует точка, проекция нормали в которой к элементарной поверхности сопряжения относительно оси j не равна нулю, то тело имеет ограничение на перемещение. Высказывание «элементарная поверхность Π_a , которая имеет проекцию нормали к ней относительно оси j равную нулю» обозначим через F_j^{Π} . Тогда получается условия

$$(B_{1j} = 1) \rightarrow \forall \Pi_a \{F_j^{\Pi}\}, \quad (3)$$

$$\exists \Pi_a \{\overline{F_j^{\Pi}}\} \rightarrow (B_{1j} = 0). \quad (4)$$

При вращении тела вокруг некоторой оси j его точки перемещаются по окружностям в плоскостях, перпендикулярных оси j . Следовательно, тело обладает возможностью вращения вокруг оси j , если его элементарные поверхности сопряжения имеет одинаковую кривизну.

Выберем a -ую и b -ую элементарные поверхности сопряжения, опорные точки которых находятся в одном сечении, перпендикулярном оси j , и имеют касательные плоскости Π_a и Π_b . Если кривизны r_a и r_b в опорных точках каждой элементарной поверхности равны между собой, то для этой оси $B_{2j}=1$, наоборот $B_{2j}=0$ (рисунок 2).

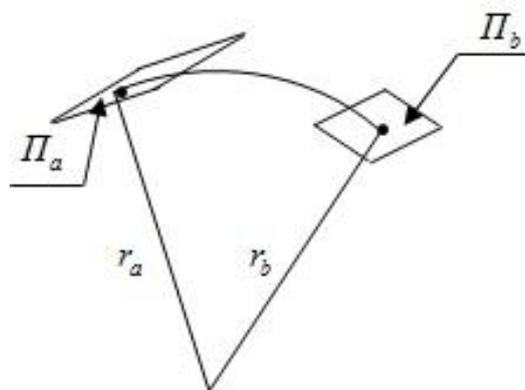


Рисунок 2 – Свойства опорных точек для B_{2j}

Обозначим высказывание «элементарная поверхность сопряжения имеет одинаковую кривизну» через F_j^B .

Тогда рассмотренное выше положение будет иметь вид истинного сложного высказывания:

$$(B_{2j} = 1) \rightarrow \forall \Pi_a \Pi_b \{F_j^B\} \quad (5)$$

Преобразовав (5), получим формулу для $B_{2j}=0$

$$\exists \Pi_a \exists \Pi_b \{\overline{F_j^B}\} \rightarrow (B_{2j} = 0). \quad (6)$$

Для получения возможно меньшей погрешности при установке сопрягаемых деталей в сборочной единице необходимо, чтобы расстояние между элементарными поверхностями детали было достаточно протяженным. Поэтому величина $L_{u \neq j}^u(K_1, K_2)$ должна быть достаточно большой, т.е. должно выполняться условие:

$$L_{u \neq j}^u(K_1, K_2) > L_{\min}^u, \quad (7)$$

где $L_{u \neq j}^u(K_1, K_2)$ – проекция расстояния между точками K_1 и K_2 на плоскость, перпендикулярную оси j ;

L_{\min}^u – наименьшее расстояние $L_{u \neq j}^u(K_1, K_2)$, при котором обеспечивается требуемая точность взаимной установки сопрягаемых деталей без перекося.

Величина L_{\min}^u зависит от геометрических характеристик поверхностей сопрягаемых деталей, их взаимной ориентации и др. При исследовании электронного макета сборочной единицы, определим L_{\min}^u по формуле:

$$L_{\min}^u = \sqrt{r_S^2 - r_{Uc}^2}. \quad (8)$$

где r_S – сферический радиус инерции сборочной единицы;

r_{Uc} – максимальный радиус инерции сборочной единицы в направлении перпендикулярном оси u .

Обозначим a -ую, b -ую и c -ую элементарные поверхности детали через Π_a , Π_b и Π_c ; протяженность элементарных поверхностей Π_a и Π_b – через L_{ab}^u ; протяженность поверхностей Π_a и Π_c в направлении оси u – через L_{ac}^u ; протяженность поверхностей Π_b и Π_c в направлении оси u – через L_{bc}^u .

Тогда требование к реальным базам детали для $B_{2j}=0$ можно записать следующей формулой:

$$\exists \Pi_a \exists \Pi_b \left\{ (L_{ab}^u > L_{\min}^u) \wedge (L_{ac}^u > L_{\min}^u) \wedge (L_{bc}^u > L_{\min}^u) \wedge \overline{F_j^B} \right\} \rightarrow (B_{2j} = 0) \quad (9)$$

Таким образом, задание нужного значения свойства B_{aj} возможно при выполнении требований (3, 4, 5, 6, 9) к геометрической форме, размерам и взаимному расположению поверхностей деталей, выбранных в качестве баз. Обозначим эти требования через W_{aj} .

Поэтому для обеспечения требуемой фиксации положения детали относительно выбранной системы координат необходимо выполнение всех частных требований W_{aj} , то есть:

$$W_K = W_{11} \wedge W_{12} \wedge W_{13} \wedge W_{14} \wedge W_{15} \wedge W_{16} \wedge W_{21} \wedge W_{22} \wedge W_{23} \wedge W_{24} \wedge W_{25} \wedge W_{26}, \quad (10)$$

где W_K – совокупность требований к ориентации поверхностей сопряжения относительно системы координат к геометрической форме установочных поверхностей тела, которые необходимо выполнить для обеспечения заданной фиксации положения тела относительно выбранной координатной системы.

После определения всех ограничений на перемещение выбираются сборочные базы для полного ограничения всех необходимых степеней свободы.

В **третьей главе** рассматриваются методы выбора базовых точек, определяющих основные базы мало жесткой детали, алгоритм решения основан на сравнении текущей деформации пакетов деталей в зоне выбора базовых точек изделия с допусаемым значением.

Для каждого типа элементов конструкции метод выбора базовых точек будет различным, поэтому первой задачей является анализ основных типовых элементов в конструкции планера самолета, который представлен на рисунке 3.

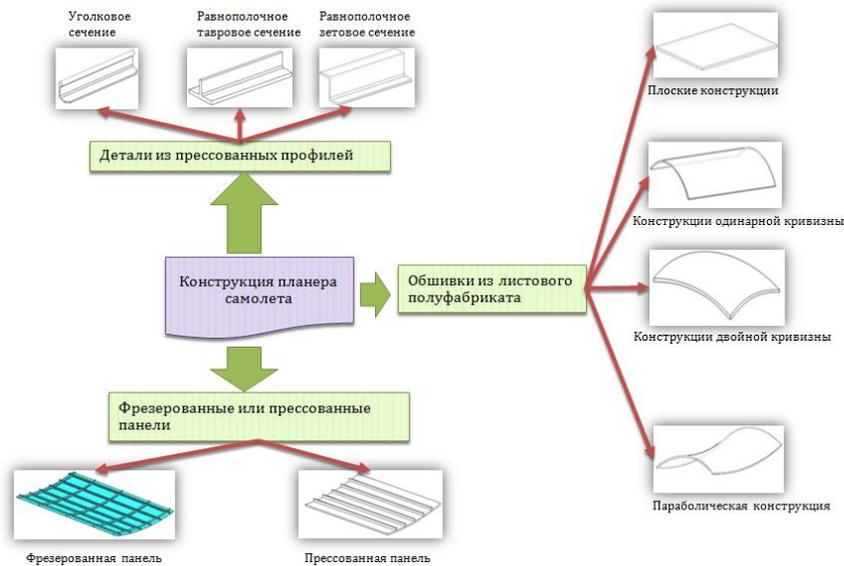


Рисунок 3 – Классификация типовых деталей планера самолета

Для типовой детали, изготовленной из прессованного профиля типа балки, на которую действует равномерно распределенная нагрузка q , $H/м$ по длине, закрепленные по точкам опоры на горизонтальной плоскости, максимальное расстояние между опорными точками определяется по формуле:

$$l_{\max} = 4 \sqrt[4]{\frac{8(w_{\text{дон}} - \delta_{\text{ффу}} + \delta_{\text{дет}})EJ_x}{\rho Fg}}. \quad (11)$$

где $w_{\text{дон}}$ – допустимый прогиб, мм;

E – модуль упругости первого рода для заданного материала детали, МПа;

J_x – момент инерции сечения относительно оси х-х, $м^4$;

ρ – плотность материала профиля, $кг/м^3$;

g – ускорение свободного падения, $м/с^2$;

F – площадь сечения профиля, $м^2$;

$\delta_{\text{дет}}$ – погрешность изготовления деталей, мм;

$\delta_{\text{ффу}}$ – погрешность изготовления базово-фиксирующего устройства СП, мм.

Далее рассматривается типовая плоская деталь (пластинка), изготовленная из листового полуфабриката. Максимальное расстояние между опорными точками определяется по формуле:

$$l_{\max} = 4 \cdot 4 \sqrt[4]{\frac{(w_{\text{дон}} - \delta_{\text{ффу}} + \delta_{\text{дет}})D}{\rho hg}}, \quad (12)$$

где h – толщина пластинки, мм;

D – характеристика жесткости пластинки.

Значение D определяется по формуле

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)}, \quad (13)$$

где ν – коэффициент Пуассона.

Также для детали типа «обшивка» как оболочки одинарной кривизны, максимальное значение l_{\max} для цилиндрической оболочки при сборке определяется по системе

$$\begin{cases} l_{\max} = \frac{2\pi m}{\beta}, \\ e^{n\pi} \cdot \cos n\pi = \frac{(w_{\text{дон}} - \delta_{\text{бфю}} + \delta_{\text{дем}})E}{\rho g R^2} + 1, \end{cases} \quad (14)$$

где R – радиус кривизны цилиндрической оболочки, мм;
 n – целое число.

При этом учитывается, что

$$\beta^4 = \frac{Eh}{4R^2 D} = \frac{3(1-\nu^2)}{R^2 h^2}. \quad (15)$$

Подобные расчеты производятся для детали типа обшивки двойной кривизны, которые можно представить как пологую оболочку, которая показана на рисунке 4.

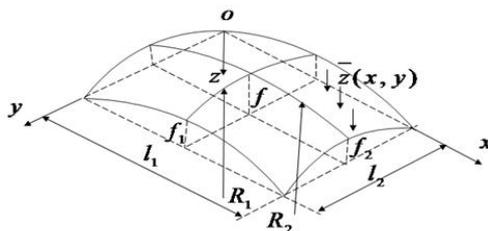


Рисунок 4 – Расчетная схема детали двойной кривизны

По приведенным расчетам мы сможем определить максимальные значения l_{\max} для оболочки при сборке

$$l_{\max} = 6.3 \cdot \sqrt[4]{\frac{16(w_{\text{дон}} - \delta_{\text{бфю}} + \delta_{\text{дем}})\pi^6 D}{64\rho h - w_{\text{дон}} E h \pi^2 (k_1^2 + k_2^2)^2}}. \quad (16)$$

где h – толщина оболочки.

Для пологих оболочек можно также принять, что $l/R_1 = k_1 = \text{const}$, $l/R_2 = k_2 = \text{const}$.

Рассмотрим также сложные по структуре детали типа «подкрепленные обшивки». Для определения прогиба подкреплённой панели из неё вдоль образующей выделим полосу такой ширины, которой соответствует расстояние между подкрепляющими элементами в поперечном сечении, где действует равномерно распределенная нагрузка q (удельный вес оболочки) по длине (рисунок 5).

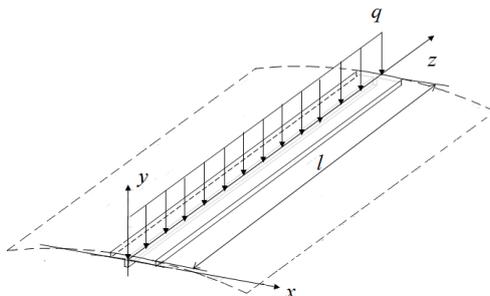


Рисунок 5 – Расчетная схема элементарной оболочки-балки, выделенной на подкрепляющей собираемой панели

Тогда максимальный прогиб в середине оболочки определяется как для детали из прессованных профилей типа балки.

Полученные в результате исследований математические зависимости позволяют рассчитать максимальное расстояние между опорными базовыми точками или шаг установки базово-фиксирующих элементов, что позволяет автоматизировать процедуры выбора сборочных баз при проектировании технологической сборочной оснастки для сборки конструкций планера самолета.

В **четвёртой главе** приводятся методы определения состава базирующих элементов сборочного приспособления при сборке с использованием дискретной математической модели маложёсткой детали, представляющая собой совокупность базовых точек на поверхности изделия, соответствующих дифференциально-геометрических характеристик в них и сопоставлении их со свойствами нормализованных элементов сборочного приспособления.

Так для условно плоского базирующего элемента (рубильник, ложемент) выявляется наличие базовых точек, лежащих в одной плоскости. Для этого рассматривается три или более базовых точек $A_1(x_1, y_1, z_1)$, $A_2(x_2, y_2, z_2)$, $A_3(x_3, y_3, z_3)$, ..., $A_n(x_n, y_n, z_n)$ расположенных относительно плоскости с отклонением от нее в пределах допуска. Уравнение плоскости (S), которая проходит через 3 произвольные базовые точки A_1 , A_2 и A_n , записывается в виде:

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_n - x_1 & y_n - y_1 & z_n - z_1 \end{vmatrix} = 0. \quad (17)$$

Решение этого уравнения позволяет определить общее уравнение плоскости (S):

$$Ax + By + Cz + D = 0. \quad (18)$$

Тогда расстояние от точки $A_i(x_i, y_i, z_i)$ до плоскости (S) определяется по формуле

$$d_i = \frac{|Ax_i + By_i + Cz_i + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}. \quad (19)$$

Полученные значения d_i сравниваются с допускаемым значением δ , в результате если $d_i \leq \delta$ то A_i находится в пределах допуска, где δ – ширина базовой поверхности стандартного базирующего элемента, например, рубильника, ложемента.

Расчет проводят для всех рассматриваемых базовых точек, после чего можно сделать вывод о возможности группировки базовых точек в плоскости в пределах регламентированного допуска.

Также все нормали в рассматриваемых базовых точках находятся в одной плоскости, если они компланарны, а это в свою очередь бывает тогда, когда смешанное произведение этих векторов равно нулю. Так три нормали $\vec{n}_1(i_1; j_1; k_1)$, $\vec{n}_2(i_2; j_2; k_2)$ и $\vec{n}_3(i_3; j_3; k_3)$ заданные своими координатами являются компланарными если:

$$\begin{vmatrix} i_1 & j_1 & k_1 \\ i_2 & j_2 & k_2 \\ i_3 & j_3 & k_3 \end{vmatrix} = 0. \quad (20)$$

Вывод о том, что нормали лежат в одной плоскости можно сделать также с учетом допустимых погрешностей. А это нужно записать соответствующими условиями.

Выбор метода сборки для конкретного изделия является первым уровнем для определения состава базирующих элементов и формирования конструктивной схемы сборочного приспособления. Процедура выбора основана на использовании математического аппарата теории распознавания образов, позволяющего произвести классификацию образов по предложенным признакам. В этом случае математическая модель сборочной единицы преобразуется в образ, включающий в себя параметры необходимые для классификации, при этом методы сборки представляют собой классы, описанные при помощи аналогичных признаков. Выбор того или иного метода сборки обуславливается комплексом факторов, зависящих от конструктивно-технологических характеристик объектов сборки, которые представлены на рис. 6.

Автором предложены методы определения всех конструктивно-технологических характеристик объектов сборки с учетом анализа того, как они влияют на выбор метода сборки. Использование этих данных определяет выбор метода сборки для каждой сборочной единицы (рисунок 6).

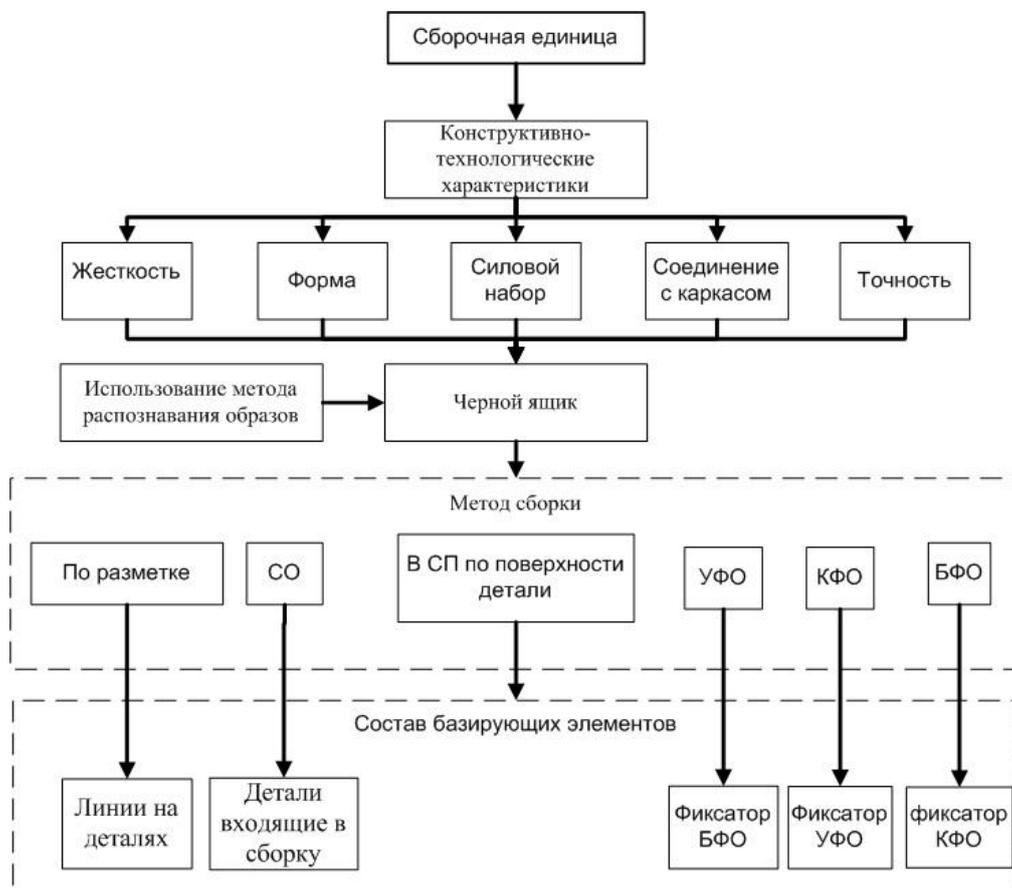


Рисунок 6 – Определения состава базирующих элементов по методам сборки

Другой задачей является определение состава внешних базирующих элементов сборочной оснастки для сборки изделия в сборочном приспособлении по поверхностям деталей. При решении этой задачи учитывается ряд характеристик, представленных на рисунке 7.

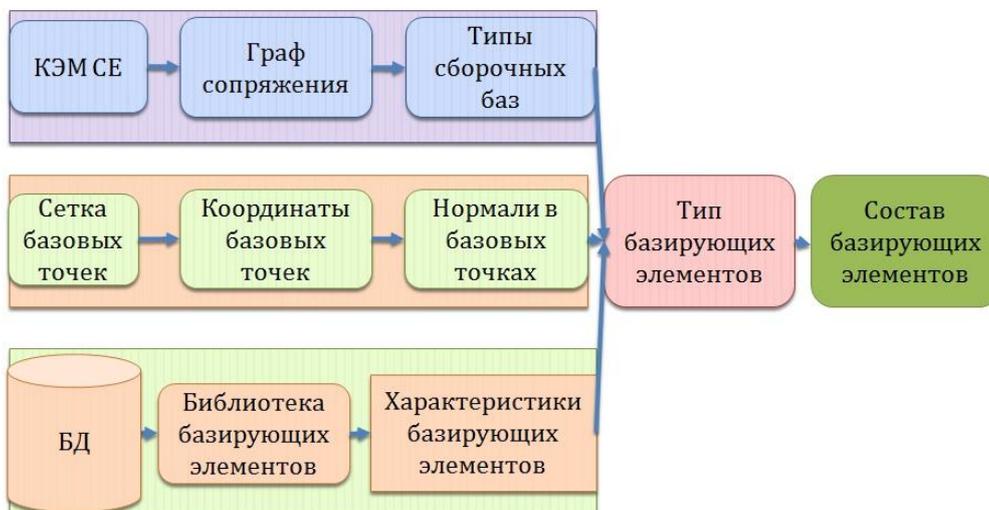


Рисунок 7 – Решения задачи определения состава базирующих элементов при сборке в сборочном приспособлении

В зависимости от типов сборочных баз, входящих в конструкцию сборочной единицы для каждого типа основных баз с учетом сочетания их свойств ставится в соответствие свой базирующий элемент из перечня базирующих элементов с типовой функцией.

В зависимости от расположения неупорядоченного состава базовых точек на поверхности изделия для фиксации группы точек можно использовать базирующие элементы, которые объединяют несколько базирующих элементов в одном в зависимости от пространственного расположения базовых точек и их нормалей.

В зависимости от конструктивно-геометрических характеристик самих базирующих элементов сборочного приспособления определяются их специфические геометрические характеристики, а также направление фиксации, отношение геометрической формулы базирующих элементов с теорией, функциональное назначение и др.

Полученные в результате исследований математические зависимости позволяют автоматизировать процедуры выбора типовых базирующих элементов, которые задают необходимые ограничивающие связи на пространственное положение мало жесткой детали.

В **пятой главе** рассматривается метод автоматизированного проектирования элементов сборочного приспособления по выбранным базам. Метод представляет собой процесс, основанный на типовых процедурах конструктора по проектированию конструктивных элементов с помощью средства программного расширения NX/Open API, выполняющего алгоритмы построения запрограммированные на языке программирования C++ с сохранением данных при

помощи СУБД Oracle.4. Структурно система содержит некоторые модули, которые показаны на рисунке 8.

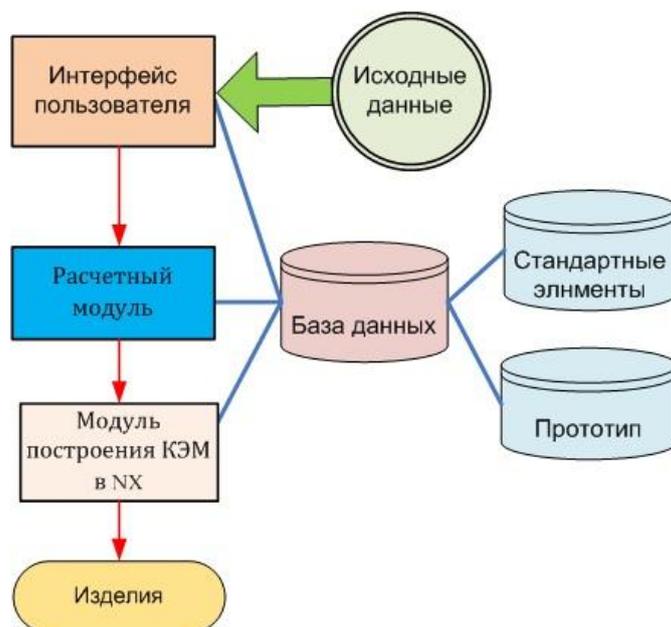


Рисунок 8 – Схема взаимодействия модулей программы

Основная цель разработки системы автоматизированного проектирования заключается в создании программного продукта способного самостоятельно, создавать электронный макет элементов сборочного приспособления, в идеале без участия, но под контролем конструктора. Работа программы построена в виде интерфейса для проектирования рамы (рисунок 9), стойки (рисунок 10), рубильника (рисунок 11), и малых базирующих элементов (например Г-образный прижим, который приведен на рисунке 12).

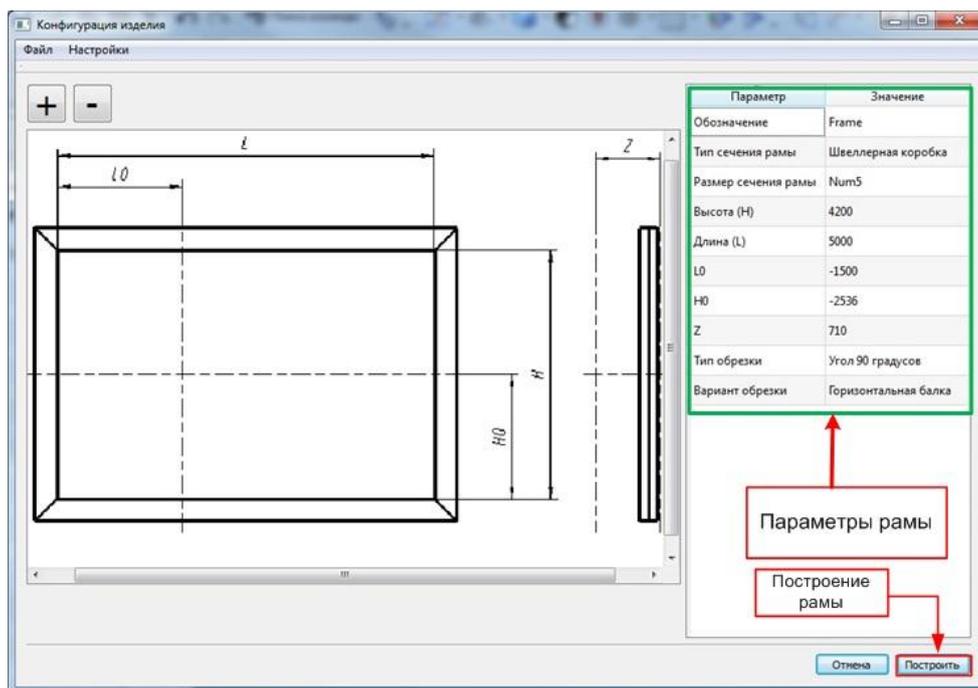


Рисунок 9 – Выбор размеров рамы

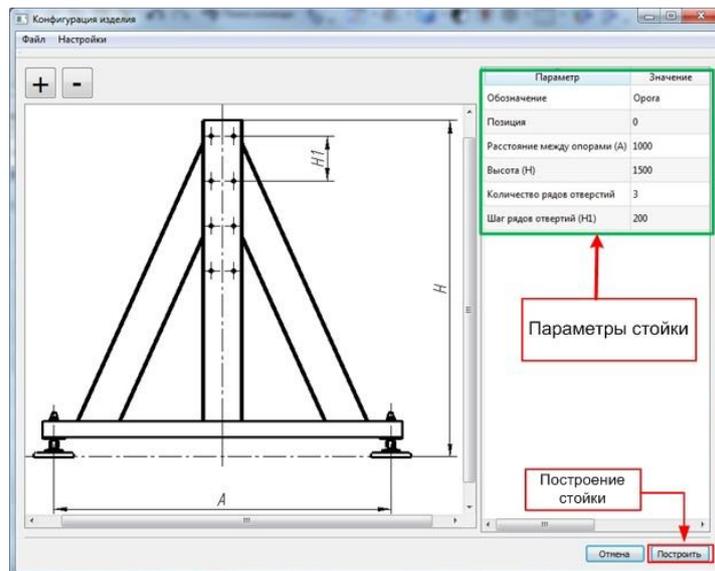


Рисунок 10 – Выбор размеров опоры

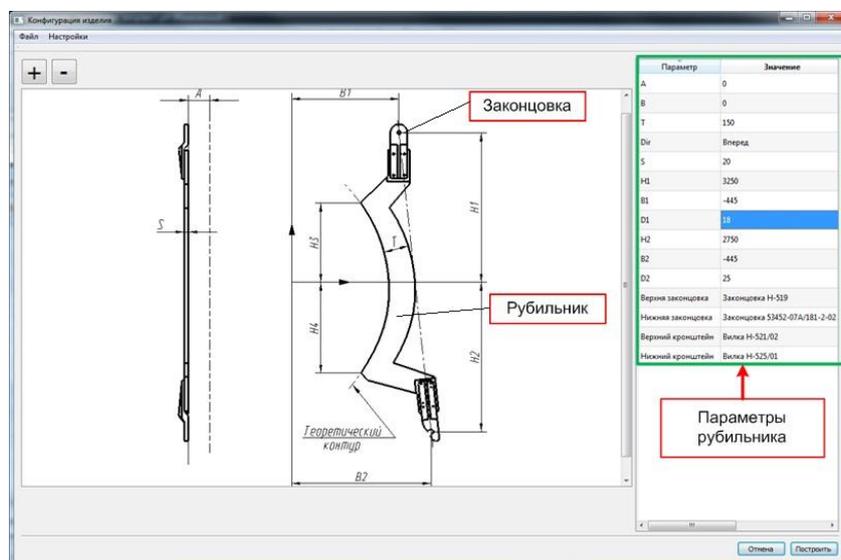


Рисунок 11 – Выбор размеров рубильника

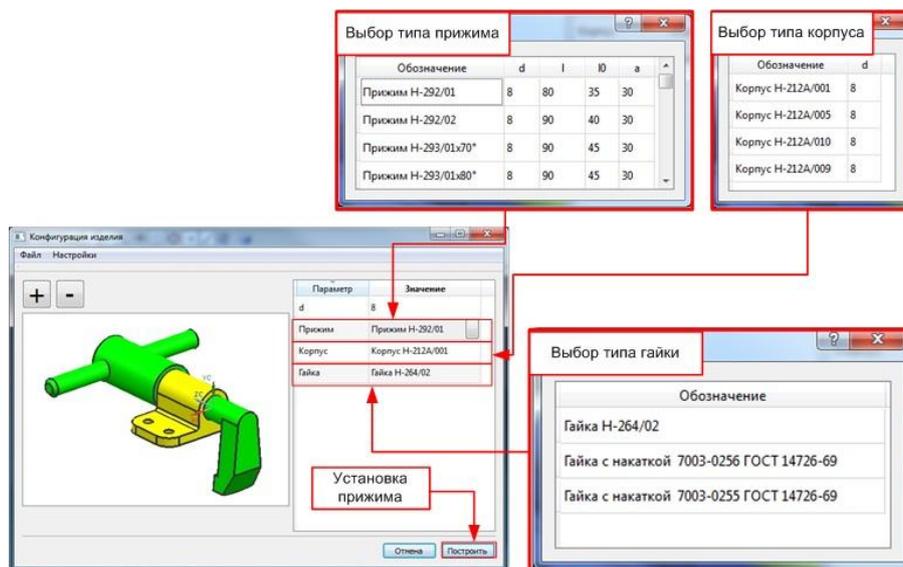


Рисунок 12 – Выбор компонентов фиксатора

После выбора баз для создания элементов СП, программным модулем выполняется проектирование рамы, опоры, рубильника и установка малых базующих элементов (рисунок 13), согласно выбранным базам.

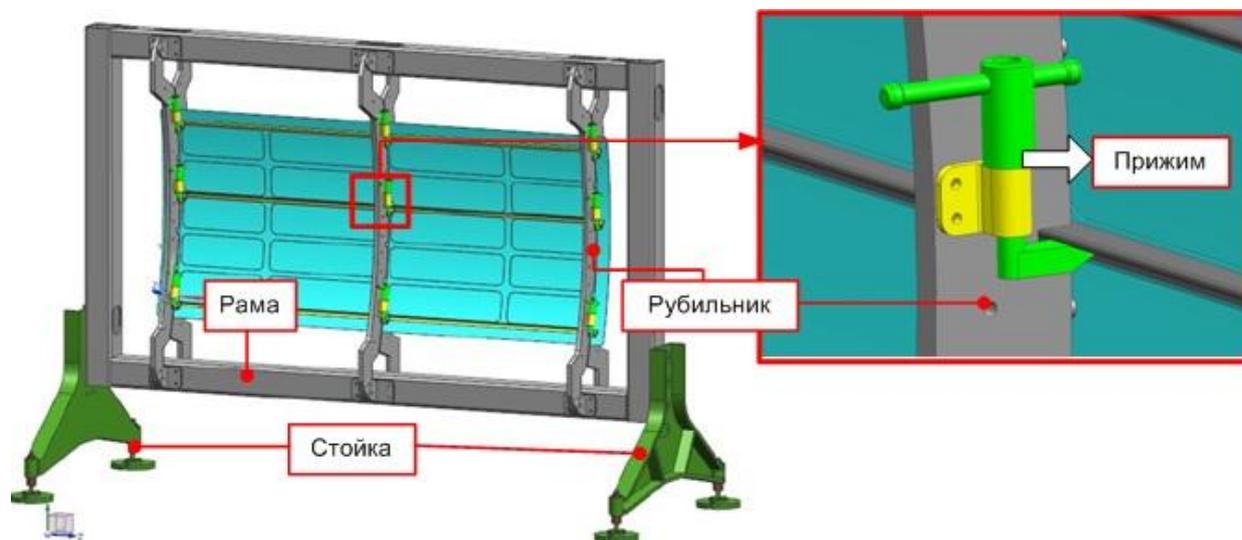


Рисунок 13 – Конструкции проектируемых базующих элементов в составе сборочного приспособления

Использование автоматизированной системы проектирования объектов сборочного производства позволяет увеличить уровень автоматизации на этапах проектирования средств технологического оснащения и как следствие улучшить основные показатели рабочего проектирования.

В заключении сформированы основные результаты и выводы по проведенному диссертационному исследованию.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Основные **научные результаты** сводятся к следующему.

- 1) впервые предложена методика выбора элементарной поверхности на детали в зоне сопряжения ее с другой деталью сборочной единицы, дифференциально-геометрические свойства всех точек которой признаются равными в пределах удовлетворения принятым критериям;
- 2) разработана методика анализа и выбора ограничивающих связей на взаимное расположение сопрягаемых деталей сборочной единицы на основе анализа дифференциально-геометрических характеристик локальных зон их поверхностей сопряжения;
- 3) разработана методика построения дискретной математической модели маложесткой детали сборочной единицы на основе определения базовых точек на ее поверхности, задающих основные базы необходимые и достаточные для полного ограничения всех степеней свободы;
- 4) разработан алгоритм определения состава базующих элементов сборочного приспособления, использующий дискретную математическую модель маложесткой детали сборочной единицы.

Основные **практические выводы** по работе.

1. сокращение цикла технологической подготовки производства и повышение качества проектных решений за счет использования формализованных алгоритмов определения состава сборочных баз и построения автоматизированной системы проектирования элементов СП;
2. снижение влияния субъективного фактора при принятии решений в ходе автоматизированного проектирования элементов сборочного приспособления для сборки маложестких изделий, благодаря использованию выявленных формальных критериев выбора состава сборочных баз;
3. математическая модель реализована в информационной среде предприятия внедрения, включающей базовую CAD/CAM/CAE систему NX 7.5 Siemens PLM Software, а также средства программного расширения NX/Open API, среду программирования C++ с сохранением данных в СУБД Oracle;
4. разработан алгоритм и программное обеспечение автоматизированного проектирования элементов сборочного приспособления по принятой модели базирования;
5. предложен математический аппарат, применимый для решения ряда задач технологической подготовки сборочного производства:
 - выбор состава сборочных баз изделия;
 - выбор состава базирующих элементов сборочной оснастки.

Результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе кафедры «Самолётостроение и эксплуатация авиационной техники» ИрГТУ в дисциплинах «Автоматизация проектно-конструкторских работ и технологических процессов», «Автоматизация технологической подготовки производства и технологических процессов» и «Проектирование сборочных приспособлений» (получен акт внедрения).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

1. Ахатов Р.Х., Чьен Х.В. Определение степеней свободы элементов конструкции сборочной единицы / Р.Х. Ахатов, Х.В. Чьен // Вестник ИрГТУ. – 2012. – Том 73. – №2. – С. 57-62.
2. Ахатов Р.Х., Чьен Х.В. Выбор опорных базовых точек при определении схемы базирования сборочной единицы / Р.Х. Ахатов, Х.В. Чьен // Вестник МАИ – 2013. – Том 20. – №3. – С. 110-118.
3. Чьен Х.В., Лаврентьева М.В. Определение состава базирующих элементов сборочного приспособления при сборке авиационного изделия/ Х.В. Чьен, М.В. Лаврентьева // Вестник ИрГТУ. – 2013. – Том 82. – №11. – С. 74-80.
4. Лаврентьева М.В., Чьен Х.В. Автоматизированное проектирование электронных макетов элементов сборочной оснастки посредством программного модуля NX/Open API / М.В. Лаврентьева, Х.В. Чьен // Научный журнал «Известия Самарского научного центра Российской академии наук» – 2013 том 15, №6 (2).– С. 395-399.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

5. Ахатов Р.Х., Чимитов П.Е., Васильев А. В., Чьен Х.В., Дубинин Д. А. Система автоматизированного проектирования сборочного приспособления «САП-СП»/ Р.Х. Ахатов, П.Е. Чимитов, А.В. Васильев, Х.В. Чьен, Д.А. Дубинин // свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013660707 от 15 ноября 2013 г./ Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2013 г.

Статьи в прочих изданиях

6. Ахатов Р.Х., Чьен Х.В. Определение состава сборочных баз при автоматизированной сборке маложестких деталей / Р.Х. Ахатов, Х.В. Чьен // Сборник статей II Всероссийской научно-практической конференции, приуроченной ко Дню космонавтики. (Иркутск, 11-13 апреля, 2012 г.) – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2012. – С. 6-9.
7. Ахатов Р.Х., Чьен Х.В. Определение состава сборочных баз при автоматизированной сборке маложестких деталей / Р.Х. Ахатов, Х.В. Чьен // Материалы Всероссийской научно-технической конференции. (Москва, 20-22 ноября, 2012 г.) – М.: МАТИ, 2012. – С. 161-162.
8. Ахатов Р.Х., Чьен Х.В. Определение степеней свободы элементов конструкции сборочной единицы/ Р.Х. Ахатов, Х.В. Чьен // Труды XIV Всероссийской научно-технической конференции. «Наука Промышленность Оборона»; Новосиб. Гос. техн. Ун-т, Новосибирск, 2013. – С. 655-656.
9. Ахатов Р.Х., Чимитов П.Е., Дубинин Д.А., Васильев А.В., Ха-Ван Чьен. Реализация системы автоматизированного проектирования сборочной оснастки / Р.Х. Ахатов, П.Е. Чимитов, Д.А. Дубинин, А.В. Васильев, Ха-Ван Чьен // Научно-технический журнал Наука и Технологии в промышленности; . – №1-2/2013., Иркутск, 2013. – С. 53-56.
10. Чьен Х.В, Автоматизация процедуры установки вспомогательных элементов сборочного приспособления при автоматизированном проектировании сборочной оснастки в самолетостроении/ Х.В. Чьен// Сборник научных трудов студентов и преподавателей института авиационного строительства и транспорта «Авиационное строительство и транспорт Сибири – 2013». – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. – С. 5-11.
11. Чьен Х.В, Новый подход к определению базовых точек сборочной единицы / Х.В. Чьен// Сборник статей международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы развития науки» (Уфа, 14 февраль, 2014 г.), – Уфа: РИЦ БАШГУ, 2014. – С. 206-207.