

Методологические основания разработки системы автоматизированного проектирования приспособлений для сборки летательных аппаратов

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Создание (проектирование, конструирование, изготовление и монтаж) приспособлений для сборки летательных аппаратов (самолетов, вертолетов, ракетно-космических комплексов) занимает одно из главных мест в технологической подготовке авиационного производства.

Более 80-90% всех специфицированных сборных частей планера летательных аппаратов (ЛА) требуют обязательного использования при их сборке специальных (или специализированных) сборочных приспособлений (СП). Это означает, что для сборки современного самолета требуется в среднем не менее 150-300 единиц СП при опытном производстве и в 2,5-3 раза больше – при серийном изготовлении ЛА.

Ввиду того, что большинство СП представляют собой конструктивно сложные инженерные сооружения и составляют большую номенклатуру в подготовке производства, то на проектирование, конструирование и изготовление их требуются большие трудовые и материальные затраты, а сроки полного оснащения сборочного производства растягиваются на многие месяцы и годы.

Из анализа предшествующих исторических периодов освоения и изготовления новых конструкций ЛА следует, что затраты на создание СП возрастали по экспоненциальному закону. Так, если в начале 50-х годов прошлого столетия, когда реактивная авиация только набирала темпы своего развития, на разработку сборочной оснастки для таких самолетов, как истребитель МиГ-17, средний бомбардировщик Ил-28, штурмовик Су-8, требовалось затратить порядка 6-8 месяцев инженерного труда коллектива конструкторов в количестве 10-15 человек, то в 70-е годы, когда самолеты существенно усложнились конструктивно и увеличились в габаритных размерах (пассажирские реактивные авиалайнеры Ил-18, Ту-104, Ан-10, Ту-124 и др.), на проектирование необходимого комплекта СП потребовалось не менее 24-36 месяцев работы конструкторов по сборочной оснастке в количестве 40-50 человек. Тенденция увеличения затрат и сроков создания СП продолжилась в последующие годы, особенно при освоении таких самолетов-гигантов, как транспортно-грузовые Ан-124 «Руслан», Ан-225 «Мрія» и др. Создание стапельно-сборочной оснастки для таких самолетов старыми традиционными средствами и способами не оправдывалось экономически, а для некоторых видов СП (например для сборки фюзеляжа) становилось технически трудно осуществимой задачей.

Стало очевидным, что для повышения эффективности технологической подготовки сборочного производства необходимо основное внимание обратить на работы, связанные с рациональным оснащением сборочных процессов, решая задачи по трем направлениям:

- сокращение сроков и ускорение темпов создания необходимого количества СП для оснащения серийного сборочного производства ЛА;

- интенсификация инженерного труда и снижение затрат на проектирование сборочных приспособлений, уменьшение трудоемкости изготовления как отдельных элементов СП (главным образом – базово-фиксирующих устройств), так и монтажа СП на рабочих местах в сборочных цехах;

- повышение качества конструкций СП и качества их изготовления для обеспечения необходимой точности форм и размеров собираемых в них изделий для повышения производительности сборки путем обеспечения более удобных подходов к рабочим зонам при установке, фиксации и соединении входящих элементов собираемых конструкций, удобства выема и транспортировки собранного изделия из СП.

Для решения этих задач следовало искать новые пути повышения качества СП и сокращения сроков и затрат на их создание. Одним из привлекательных эффективных путей, на который было обращено внимание специалистами авиапрома, был путь разработки и применения методов и средств компьютерных технологий с переходом к автоматизированному проектированию и изготовлению на всех этапах создания СП, а именно: при разработке технических предложений, проектировании геометрического облика и конструировании рабочего проекта СП, разработке рабочих чертежей на составные части приспособления, разработке технологических процессов изготовления деталей СП на станках с числовым программным управлением, разработке технологии монтажно-сборочных и контрольно-измерительных операций окончательной сборки СП как единого целого сооружения.

С повышением требований к точности изготовления обводообразующих частей планера высокоскоростных ЛА и к точности взаимной увязки геометрических форм сопрягаемых элементов (разъемов и стыков), а также с ростом габаритных размеров ЛА объективно происходило увеличение точностных и весовых характеристик сборочных приспособлений, которые превращались в высокоточные по геометрическим параметрам массивные многотонные инженерные сооружения – сборочные стапели зачастую с вмонтированными в них средствами механизации для выполнения технологических процессов сборки.

Все это вело к резкому увеличению затрат на проектирование и изготовление сборочных приспособлений. Поэтому актуальность решения проблемы автоматизированного создания СП для сборки новых конструкций ЛА назревала в последние десятилетия XX столетия как **насуцная объективная необходимость** и как **реальная возможность** ее осуществления.

Объективная необходимость разработки методов и средств автоматизированного создания СП состояла в стремлении уменьшения сроков подготовки производства и повышения качества серийного изготовления вновь создаваемых ЛА (стремительно конструктивно усложняющихся и часто сменяемых в производстве).

Реальная возможность перехода к автоматизированному проектированию СП на предприятиях авиационной промышленности состояла в том, что благодаря большим достижениям в области разработки электронно-вычислительной техники стали доступными персональные ЭВМ, а также мощные графические рабочие станции. Появилась возможность использования многофункциональных систем проектирования для решения задач автоматизации проектных работ.

Первые разработки отдельных элементов автоматизированного проектирования конструкций СП и изготовления их обводообразующих элементов

базово-фиксирующих устройств (БФУ), как наиболее трудоемких в изготовлении, были осуществлены в авиастроении в 80-90-е годы прошлого столетия [1-5] в виде: 1) системы информационной поддержки оперативного поиска типовых конструкций СП и составных элементов БФУ и разработки принципиального облика конструкций СП, 2) разработки технологии автоматизированного изготовления обводообразующих контуров БФУ на станках с числовым программным управлением.

Для решения первой задачи необходимо было, прежде всего, создать базу данных на основе нормативно-технических документов, охватывающих весь комплекс сведений о типовых технологических процессах сборки конструкций ЛА различными методами сборки, о типовых конструкциях сборочных приспособлений и их составных элементах (ложементах, рубильниках, стапельных плитах, узлах и механизмах установки и фиксации собираемых объектов), а также о составных частях каркасов СП (основаниях, колоннах, балках, кронштейнах и соединительных деталях и др.) с учетом реальных возможностей использования базы данных в разработанных в то время автоматизированных системах [6].

Разработанная нами база данных [2] применительно к системе AutoCAD удовлетворяла основным требованиям этой системы: 1) взаимодействие пользователя (конструктора по проектированию СП) с разработанной базой данных осуществлялось в диалоговом режиме; 2) объектами базы данных служила поисковая геометрическая, текстовая, иллюстративная и параметрическая информация; 3) доступ пользователя к базе данных осуществлялся по имени, ключу или номеру; 4) работа с базой данных велась с помощью системы иерархических меню.

База данных, являющаяся основной частью информационной поддержки системы автоматизированного проектирования СП, была встроена в систему AutoCAD.

Система информационной поддержки процесса автоматизированного проектирования СП на первом уровне ее развития позволяла решать следующие задачи:

- выбор базового графического образа сборочного приспособления из числа типовых аналогичных конструкций в соответствии с классификатором сборочных приспособлений. Базовый вариант образа СП принимался конструктором в качестве текущего чертежа;

- поиск множества графических объектов – элементов каркаса и базово-фиксирующих устройств СП, анализ и выбор рациональных элементов и включение их в текущий чертеж СП;

- поиск текстовой информации о характеристиках и параметрах выбранных объектах и включение ее в текущий проект СП;

- формирование и компоновка общего вида СП, дополнение недостающими элементами, оформление окончательного варианта СП.

Эта система по своей сути была системой оперативного поиска и формирования облика СП из числа типовых, стандартных или нормализованных элементов конструкций сборочных приспособлений, оптимального выбора и формирования конструкции СП путем широкого перебора возможных вариантов с помощью ЭВМ.

Экономическая эффективность предложенной технологии автоматизированного проектирования СП, как подтвердила практика ее

использования на Харьковском авиационном заводе, достигалась путем сокращения длительности разработки и формирования окончательного варианта СП, выполнения графических работ на ЭВМ, оптимизации конструкции СП благодаря оперативному перебору возможных вариантов проекта.

Однако предложенная система поддержки автоматизированного проектирования СП не решала многих принципиальных конструктивно-технологических задач автоматизации расчетов и выбора основополагающих параметров СП:

1) формирование первоначального (эскизного) геометрического облика сборочного приспособления в зависимости от конструктивных характеристик объекта сборки и принятого технологического метода сборки;

2) определение (расчет) оптимального количества и мест размещения базово-фиксирующих устройств сборочного приспособления, обеспечивающих заданную точность собираемого объекта и его функциональную взаимозаменяемость по аэродинамическим поверхностям, конструктивным разъемам и технологическим стыкам;

3) расчет прочности и жесткости основных элементов сборочного приспособления (каркаса и базово-фиксирующих устройств), обеспечивающих несущую способность и допустимые прогибы конструкции сборочного приспособления;

4) расчет допустимых погрешностей процесса изготовления и монтажа сборочного приспособления, обеспечивающих заданную точность и взаимозаменяемость собираемого изделия;

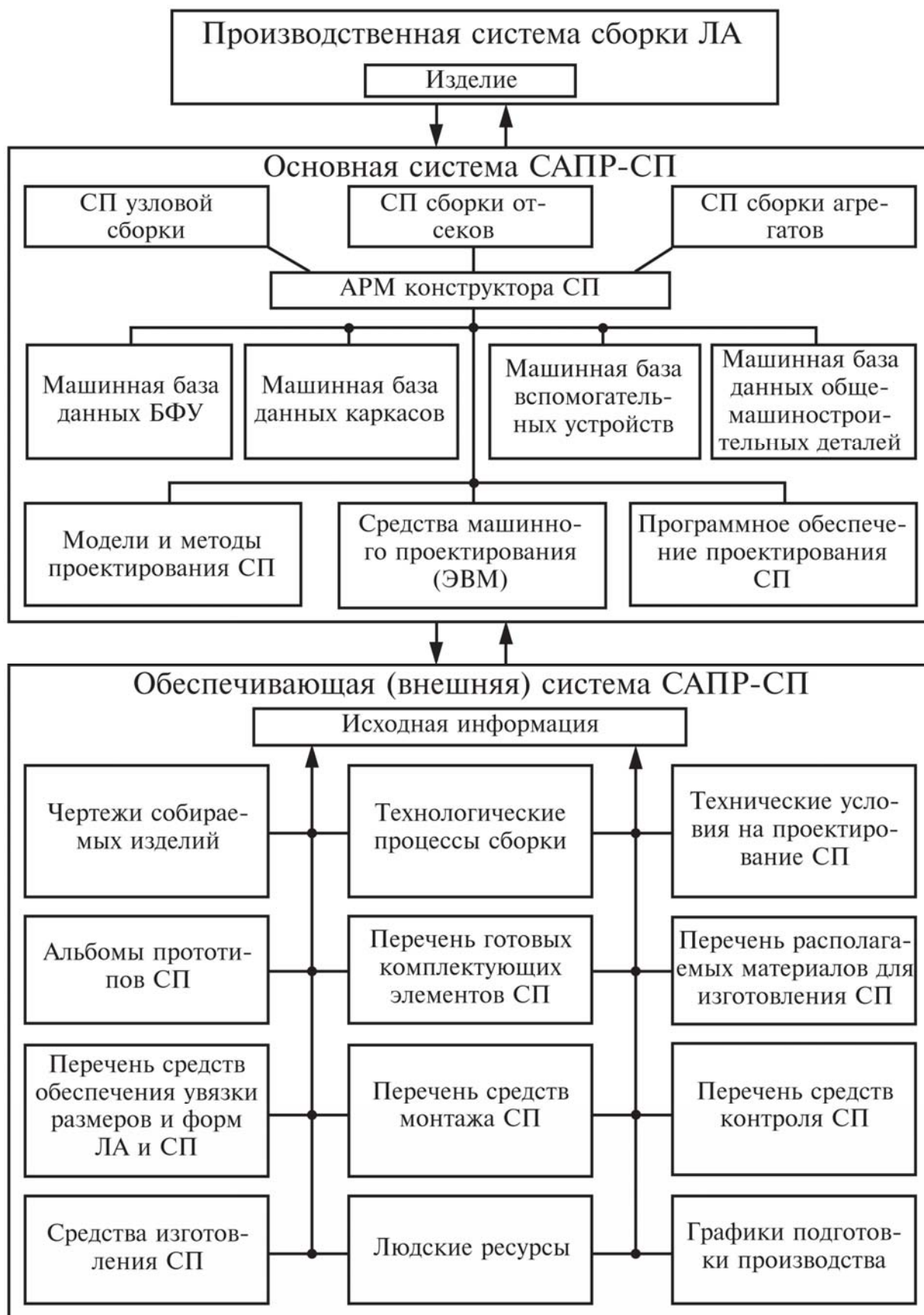
Очевидно, что перечисленные задачи могли быть решены только при условии разработки научно обоснованных логико-математических моделей и методов, алгоритмизации их и написания прикладных программ для всей совокупности поставленных задач с последующим объединением в комплексную интегрированную систему автоматизированного проектирования сборочных приспособлений для сборки летательных аппаратов всех классов и типов (САПР-СП).

Положив в основу принципы системного подхода к решению сложных научно-технических задач, к числу которых следует отнести и систему автоматизированного проектирования сборочных приспособлений для сборки ЛА, представим ее общую структуру САПР-СП в виде двух блоков: основной системы – проектирующей и вспомогательной – обеспечивающей (см. рисунок).

Основной блок САПР-СП отражает предметную область системы (СП, предназначенные для узлов, секционной и агрегатной сборки ЛА); содержит внутреннюю базу данных (перечисленных ранее) в виде машинных файлов; модели и методы проектирования составных частей СП; прикладные программы для решения конкретных задач в соответствии с разработанными моделями и методами; технические и организационно-управленческие средства автоматизированного рабочего места (АРМ) конструктора СП.

Вспомогательный блок является внешней информационной базой данных, на основе которых формируются условия на проектирование СП, формируются входные данные для аппаратной части системы.

Для принятия оптимальных решений при проектировании сборочного приспособления вспомогательный блок должен располагать достаточными данными для диалогового анализа и синтеза окончательного варианта СП:



Структура модели проектирования сборочных приспособлений

о прототипах СП, наличии на предприятии готовых стандартных элементов СП, наличии материалов для изготовления элементов СП, наличии соответствующего оборудования и средств монтажа СП, наличии средств обеспечения увязки форм и размеров СП, наличии транспортных средств для монтажа СП, наличии квалифицированных исполнителей.

Как следует из приведенной структуры САПР-СП, она представляет собой многоуровневую сложную систему, декомпозиция которой на самостоятельные компоненты является объективной необходимостью для детального и полного их анализа и последующего синтеза в единое целое для достижения главной цели САПР-СП – создания интегрированной системы комплексного проектирования СП, обеспечивающей снижение затрат и сроков на технологическую подготовку сборочного производства и повышения качества ЛА.

Центральным ядром системы и наиболее наукоемким в процессе проектирования САПР-СП является разработка моделей и методов решения конкретных компонент системы, алгоритмов и программного обеспечения (разработка прикладных программ и привязка их к существующим системам автоматизированного проектирования).

Разработка моделей и методов, базирующихся на принципах модульного моделирования разнородных связей и отношений между параметрами (изменяемыми переменными) и характеристиками (независимыми переменными) в интегрированной системе, возможна на основе использования различных научно-технических подходов. При этом необходимо обеспечить совместимость модулей для создания единой интегрированной модели. Для достижения этой цели было принято графоаналитическое представление и математическое описание входящих в систему моделей.

В связи с этим построение моделей системы автоматизированного проектирования САПР-СП осуществлялось выполнением следующих процедур:

1. Формализованное описание СП как объекта проектирования на основе выявленных параметров и характеристик, которые наиболее существенно влияют на результаты моделирования. Количество этих параметров выбрано таким, чтобы их набор давал достаточную информацию для принятия необходимых решений на определенном уровне проектирования СП.

2. Разработка математического описания моделей на основе абстрактного графического представления и использования конечных алгебраических и трансцендентных уравнений для описания геометрических, прочностных, функциональных отношений параметров и характеристик СП как сложной технической системы.

3. Разработка вычислительных алгоритмов моделей, т.е. очевидной последовательности расчетов и логических процедур для решения поставленной задачи, проводимых на основе выбранных (или разработанных) методов.

4. Осуществление программной реализации алгоритмов математических моделей (программное обеспечение может базироваться на существующие системы или на разработанные специально для решения поставленных задач).

Изложенная методологическая концепция разработки моделей автоматизированного проектирования проектно-аналитического облика сборочных приспособлений в соответствии с приведенным составом обязательных процедур

реализована автором в виде разработки следующих локальных аналитических моделей:

1) рационального числа и мест расположения БФУ в СП в следующей постановке: найти такое минимальное число мест размещения БФУ, которое обеспечивало бы заданную точность собираемого в приспособлении объекта, т.е.

$$[\delta_{CB}]_{PP} \leq [\delta_{CB}]_{TY}, \quad (1)$$

где $[\delta_{CB}]_{PP}$ – точность сборки собранного объекта в СП,

$[\delta_{CB}]_{TY}$ – заданная по техническим условиям точность собираемого объекта;

2) рационального выбора конструкций СП (опорных колонн, несущих балок, БФУ) в следующей постановке:

а) конструкция любого элемента СП должна обеспечивать допустимую прочность, т.е.

$$[\sigma_{pac}]_{PP} \leq [\sigma]_{TY}, \quad (2)$$

где $[\sigma_{pac}]_{PP}$ – расчетная величина прочности конструкций СП,

$[\sigma]_{TY}$ – допустимая прочность материала, из которого изготовлена конструкция СП;

б) конструкция любого элемента СП (особенно продольных и поперечных несущих балок) должна обеспечивать допустимые прогибы, т.е.

$$[Z_{PP}]_{ИЗГ} \leq [f_{CB}]_{TY}, \quad (3)$$

где $[Z_{PP}]_{ИЗГ}$ – расчетная величина прогиба,

$[f_{CB}]_{TY}$ – допустимая величина прогиба;

3) рациональной точности изготовления и монтажа СП в следующей постановке:

$$[\delta_{PP}]_{ИЗГ} \leq [\delta_{CB}]_{TY}, \quad (4)$$

где $[\delta_{PP}]_{ИЗГ}$ – расчетная величина точности изготовления СП,

$[\delta_{CB}]_{TY}$ – заданная точность изготовления собираемого объекта.

Исследования, проведенные на авиационных предприятиях, и анализ влияния параметров и характеристик сборочных процессов, осуществляемых в СП, позволили установить функциональные отношения и зависимости между ними для разработки перечисленных выше моделей.

Так, для разработки модели определения мест размещения БФУ, удовлетворяющих условию (1), необходимо математическое описание взаимовлияния следующих характеристик и параметров: величин погрешностей

изготовления деталей $\delta_{дет}$ поступающих на сборку; погрешностей изготовления сборочных приспособлений $\delta_{пр}$ и, как результат, их суммарной погрешности взаимной увязки $C_{пр-дет}$ в местах установки БФУ; величины шага установки БФУ вдоль базлируемых контуров собираемых деталей $t_{БФУ}$; усилий прижатия деталей к опорным поверхностям БФУ для фиксации в сборочном положении $Q_{БФУ}$; знание механических характеристик материалов, из которых изготовлены собираемые детали - σ, E, J .

Тогда величина шага установки БФУ - $t_{БФУ}$ вдоль базлируемых контуров собираемых деталей, удовлетворяющая условию 1, - есть функциональная зависимость множества перечисленных выше характеристик и параметров, влияющих на процесс сборки:

$$t_{БФУ} = F(\delta_{дет}, \delta_{ПР}, C_{пр-дет}, Q_{БФУ}, \sigma_e, E, J), \quad (5)$$

Раскрытие функционала (5) осуществлено на основании математического описания процесса базирования, фиксации (прижима) деталей при сборке и расфиксации собранного изделия. Полученная математическая модель позволяет находить оптимальное расположение БФУ, варьируя значения $\delta_{дет}, \delta_{ПР}, C_{пр-дет}$ при условии неперевышения контактных напряжений $\sigma_{кон}$ в собираемых деталях выше допустимых.

Для разработки модели прочностных расчетов конструктивных элементов СП, удовлетворяющих условиям 2 и 3, необходим учет следующих параметров и характеристик: геометрической схемы СП (однобалочная, двухбалочная, многобалочная и места установки опорных колонн - $L_{ПР}, H_k, L_k$, характеристик силового нагружения конструктивных элементов СП в процессе сборки (сосредоточенные силы P , распределенные нагрузки q , изгибающие $M_{изг}$ и крутящие моменты $M_{кр}$); механических характеристик материалов, из которых будут изготовлены элементы СП - σ, E , а также геометрических характеристик сечений балок и колонн (статический момент инерции $S_{ст}$, момент сопротивления изгибу W , осевой момент инерции J и др.).

В этом случае функционал множества перечисленных параметров и характеристик позволит рассчитать значения прочности $\sigma_{расч}$ и жесткости $Z_{расч}$ элементов конструкции СП, удовлетворяющих условиям 2 и 3

$$\left. \begin{matrix} \sigma_{расч} \\ Z_{расч} \end{matrix} \right\} = F(L_{ст}, H_k, l_k, P, M_{изг}, M_{кр}, Q_{пер}, J, S, W). \quad (6)$$

Раскрытие функционала (6) и математическое описание модели нахождения искомых $\sigma_{расч}$ и $Z_{расч}$ осуществлены для типовых схем нагружения балок, колонн и других элементов СП с использованием методов классической теории механики деформируемых твердых тел [7].

Модели расчета точности изготовления СП, удовлетворяющих условию 4, разработаны на основании методов классической теории размерных цепей [8,9] с учетом особенностей самолетостроительного производства. Главная особенность переноса информации о геометрических параметрах форм и размеров при изготовлении деталей планера ЛА (в том числе и СП) состояла в учете использования в авиастроении специфического способа – **исключительно путем копирования** с помощью жестких носителей (теоретических и конструктивных плазов, плоских шаблонов, объемных эталонов и макетов) так называемым методом многократного переноса форм и размеров. На каждом этапе копирования неизбежно возникает дополнительная погрешность δ_i и в конечном счете результирующий размер (замыкающее звено размерной цепи) определяется как сумма накопленных погрешностей на всех этапах:

$$\delta_{зам} = F \left(\sum_{i=1}^n \delta_i \right). \quad (7)$$

Раскрытие функционала (7) проведено для основных схем увязки форм и размеров (с использованием плоских эталонов, объемных макетов и эталонов) и для основных методов сборки. Построенные модели размерных цепей позволяют выбирать такие средства копирования форм и размеров, которые обеспечивают выполнение условий точности 4.

В результате для полученных моделей разработаны синтезированные алгоритмы и ядро информационной технологии автоматизированного программного комплекса (ИПК) [12].

Программное обеспечение ИПК представляет собой исполняемое приложение, адаптированное к запуску в консольном режиме на выбранной аппаратно-программной платформе.

Анализ 39 существующих систем CAD/CAM/CAE показал, что для нашего случая решения задачи в автоматизированном режиме по предложенным моделям и методам рационально использовать в проектируемом ИПК:

- в качестве аппаратного средства – процессор Pentium Core Duo – 1,6 ГГц, с оперативной памятью 512 Мб, видеопамятью – 64 Мб;
- среди доступных операционных систем при проектировании сборочной оснастки – операционная система Windows XP;
- для выбранной операционной системы Windows XP лучшим инструментальным средством следует признать Microsoft Visual Studio 2005;
- лучшей технологией доступа к базе данных при использовании Microsoft является модернизированная технология Active Data Objects (ADO) для платформы NET.

На основании этого выбора спроектированы интегрированная система автоматизированного проектирования СП, т.е. архитектура системы в целом, и модули, которые выполняют функции автоматизации СП: основной модуль – Programs.cs, модуль описания модели предметной области – Data Models.cs, модуль правил отображения в графических компонентах диалоговых форм – Data View.cs, модуль контроля функционирования модели предметной области – Data Controllers.cs, модуль автоматизированного проектирования СП – Evaluate.cs,

модуль основных классов, используемых для организации графического интерфейса с пользователем – Forms.cs.

Результаты тестовых проверок ИПК проектирования СП на контрольных примерах дали корректные результаты расчетов для анализа и принятия решений конструктору-пользователю по формированию аналитического облика СП и дальнейшей разработке рабочей конструкторской документации.

Список литературы

1. Бабушкин А.А. Автоматизированное проектирование стапельно-сборочной оснастки // Новые технологии в машиностроении (по материалам международной конференции). – Х.: ХАИ, 1994. – С 155 – 157.
2. Бабушкин А.А., Пименов В.П. Разработка базы данных для проектирования стапельно-сборочной оснастки с помощью ПЭВМ // Новые технологии в машиностроении (по материалам международной конференции). – Х.: ХАИ, 1994. С 133 – 135.
3. Бабушкин А.И., Бабушкин А.А. Влияние конструктивно-технологических особенностей ЛА на выбор принципиальных схем сборочных приспособлений // Труды Харьковского авиационного института. – Х.: ХАИ, 1995. – С. 321 – 327.
4. Бабушкин А.А. Концепция автоматизированного проектирования специальных сборочных приспособлений в самолетостроении // Труды Харьковского авиационного института. – Х.: ХАИ. 1998. – С. 47 – 48.
5. Бабушкин А.А. Методологические подходы при создании САПР сборочных приспособлений в самолетостроении // Труды Харьковского авиационного института «Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии». – Х.: ХАИ. 1999. – С. 225 – 232.
6. Четвериков В.Н., Ревунов Г.И., Самохвалов Э.Н. Базы и банки данных: Учебник. – М.: Высш.шк., 1987. – 248 с.
7. Тимошенко С.П., Дж.Гере. Механика материалов. – М.: Мир, 1976. – 669 с.
8. Иваненко И.А. Технологические размерные расчеты и способы их автоматизации. – М.: Машиностроение, 1975. – 222 с.
9. Цепи размерные. Методы расчета плоских цепей. ГОСТ 16320 – 70. – М.: Машиностроение, 1985. – 298 с.
10. Вирт Н. Алгоритмы и структура данных / Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 360 с.
11. Ван Тассел Д. Сталь, разработка, эффективность, отладка и испытание программ / Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 332 с.
12. Бабушкин А.А. Модели и средства автоматизации проектирования сборочных приспособлений в технологической подготовке производства летательных аппаратов: Магист. дис-ция. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2007.