

В.С. Кривцов, В.В. Воронько, В.Е. Зайцев

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков

СОВРЕМЕННЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ СБОРКИ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ



На основе выполненных теоретических исследований с помощью метода виртуальных баз создана концепция автоматизированной сборки авиационных конструкций, специализированных переналаживаемых приспособлений с числовым программным управлением, а также робототехнических систем. Обоснованы принципы автоматизации сборки самолетостроительного предприятия с использованием робототехнической системы.

Ключевые слова: автоматизированное сборочное производство, робототехнические системы, специализируемые переналаживаемые приспособления с числовым программным управлением, метод виртуальных баз.

Стремительный прогресс авиационной науки и техники в последние годы позволил создать самолеты, способные летать с гиперзвуковыми скоростями, перевозить на межконтинентальных магистральных до 525 пассажиров одновременно, поднимать до 250 т грузов, осуществлять полет в любых метеоусловиях и прокладывать путь по командам бортового компьютера. Пассажирские и транспортные самолеты характеризуются сравнительно небольшими сериями выпуска при чрезвычайно широкой номенклатуре сборочных единиц. Однако нельзя забывать и о легких самолетах авиации общего назначения, которые на сегодня составляют до 97 % мирового парка гражданской авиации.

Проектирование современных авиационных конструкций осуществляется с помощью компьютерных интегрированных технологий CAD/CAM/CAE (рис. 1), а изготовление значительной части деталей производится с использованием оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ). Однако монтаж и налад-

ка сборочной оснастки происходит вручную и составляет около 40 % от общих трудозатрат при изготовлении самолета [1].

Значительный удельный вес при выполнении сборочных работ составляют затраты на операции взаимной координации деталей и узлов при их установке (базировании и фиксации) в сборочном положении, а также затраты на соединение составных частей конструкции, изготовление оснастки второго порядка и т.п. Эти затраты во многом определяются значительным объемом ручных работ и зависят от особенностей конструкции, уровня технологичности, принятой схемы членения, схемы и методов сборки, методов обеспечения взаимозаменяемости. Рост объемов выпуска изделий достигается в основном путем расширения фронта работ и увеличения численности рабочих, занятых в сборочном производстве.

Причинами большой трудоемкости и себестоимости сборочных работ в авиационной промышленности, а также значительной длительности производственного цикла являются невысокая степень механизации и автоматизации сборочных операций, а также использование ус-

таревших традиционных методов сборки и схем увязки, которые в основном ориентированы на специальные сборочные приспособления.

С учетом вышеизложенного разработка и внедрение автоматизированной сборки авиационных конструкций путем совершенствования существующих и разработки новых схем увязки и методов сборки, основанных на применении специализируемых переналаживаемых приспособлений с программным управлением и робототехнических систем, являются актуальной научной проблемой.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНТЕГРИРОВАННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Развитие современного авиастроения характеризуется усилением конкуренции на мировых рынках, что заставляет предприятия решать задачу обеспечения высокого качества продукции и экономию ресурсов (материальных, интеллектуальных, временных), привлекаемых для реализации конкретных проектов или программ на всех стадиях жизненного цикла изделия.

Ситуация на мировом рынке наукоемкой продукции развивается в сторону полного перехода на безбумажную технологию проектирования, изготовления и сбыта продукции, а также обеспечения качественного изготовления изделий при минимальных затратах труда и средств в заданные сроки и в требуемых количествах.

Назовем необходимые мероприятия, связанные с сокращением сроков технологической подготовки производства:

- ✦ использование стандартных программ для системы автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП);
- ✦ разработка и внедрение более производительных процессов проектирования, изготовления и монтажа технологической оснастки (включая САПР оснастки и применение устройств с ЧПУ);

- ✦ упрощение конструкции сборочной оснастки за счет использования методов сборки по установочно-фиксирующим отверстиям и использование рациональных схем сборки на этапах внестapelных работ;
- ✦ внедрение безплавовых методов обеспечения взаимозаменяемости (на базе математического моделирования геометрических форм агрегатов самолета);
- ✦ разработка стандартов на типовые самолетные составные части, элементы заготовительной и сборочной оснастки;
- ✦ разработка типовых переналаживаемых сборочных и испытательных приспособлений.

Интегрированное качество летательных аппаратов (ЛА), определяемое параметрами летно-эксплуатационных, ресурсных и экономических показателей, во многом зависит от технологии и организации их производства. Одним из главных элементов производственного процесса изготовления ЛА считается сборочное производство. Сборочно-монтажные работы характеризуются постоянно возрастающей сложностью работ, сравнительно невысоким уровнем механизации технологических операций, высокими трудозатратами, низким уровнем производительности и, как следствие, большой трудоемкостью и себестоимостью продукции.

В настоящее время механизации и автоматизации подлежат только те операции и переходы сборочно-монтажного процесса, которые носят массовый характер: сверление и разделка отверстий; постановка крепежных элементов (клепка заклепок, установка болт-заклепок, свинчивание болтов, винтов, гаек); операции сварки, склейки (напр., сотовых конструкций), запрессовки, развальцовки и т.д. Следовательно, вопросы совершенствования технологии сборочно-монтажных работ в самолетостроении являются чрезвычайно актуальными, т.к. они в конечном итоге определяют эффективность всего технологического процесса производства ЛА.

Проведенный обзор [2] зарубежных технологий сборки авиационных конструкций вы-

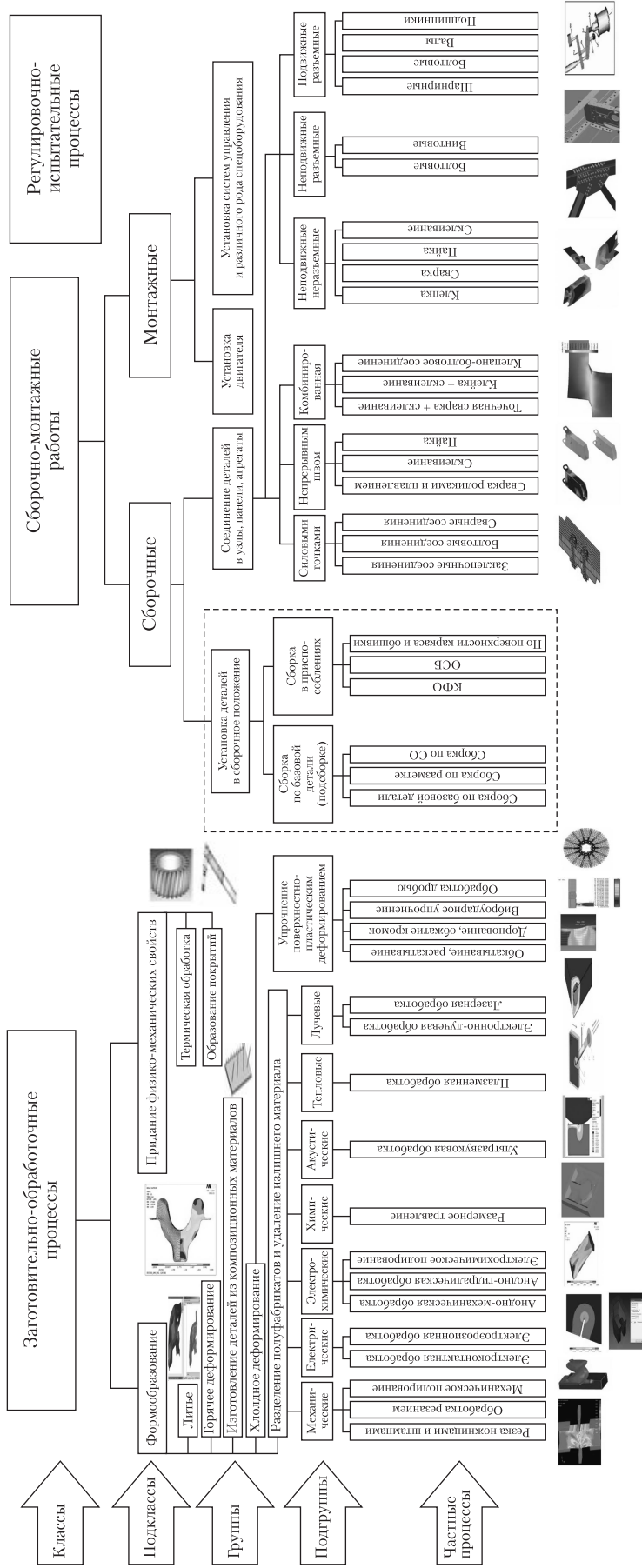


Рис. 1. Классификация процессов авиационного производства

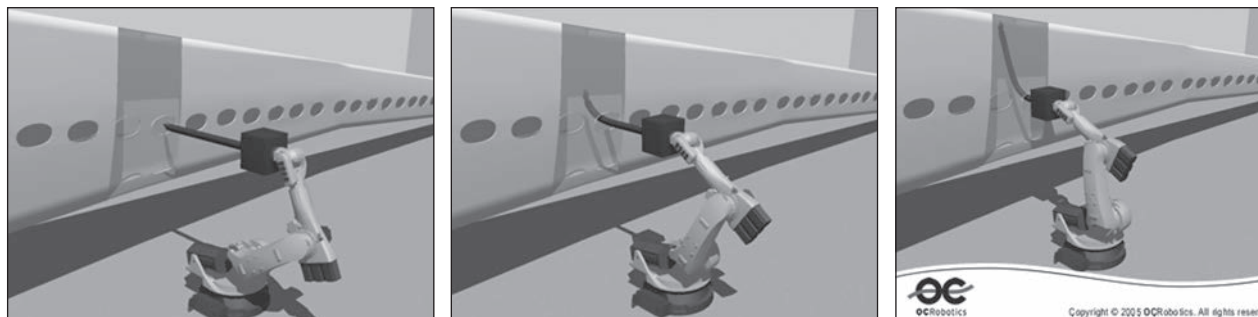


Рис. 2. Выполнение операций в кессоне крыла

явил следующие особенности сборочно-монтажных работ:

- ✦ переход на гибкие портативные системы позиционирования рабочих органов технологических систем;
- ✦ использование перенастраиваемой сборочной оснастки взамен специальной;
- ✦ применение гибких гибридных роботов;
- ✦ переход на электрические исполнительные органы систем постановки крепежных элементов и др.

С учетом результатов работы [2] и тенденций развития автоматизированной сборки нами были проанализированы конструкции промышленных роботов и возможности их применения в сборочном производстве. Пример применения робота представлен на рис. 2.

Организация совместной работы оборудования с роботами [3] достигается созданием системы группового управления. Сложность решения задачи группового управления состоит в программировании, обмене информацией и синхронизации работы разнородного оборудования, входящего в комплекс.

Проведен анализ конвейерной сборки в автомобилестроении, когда выбор метода сборки предопределяются точностью относительного положения исполнительных поверхностей деталей как результат анализа размерных цепей [2]. При этом учитывалась также экономически целесообразная точность обработки, точность применяемого оборудования и инструмента, опыт в области конструирования и результаты испытаний образцов изделия.

Жесткая конкурентная борьба между крупнейшими авиастроительными компаниями Airbus и Boeing требовала сокращения производственных расходов и увеличения скорости сборки. Поэтому с 2001 года компания Boeing провела модернизацию, поставив сборку самолетов на конвейер, когда самолет перемещается от одной бригады специалистов к другой. Комплекующие, инструмент и оборудование расположены вдоль линии продвижения собираемого самолета. Новосибирское авиационное производственное объединение им. Чкалова, входящее в авиахолдинг «Сухой», стало первым российским авиазаводом, начавшим аналогичную конвейерную сборку самолетов [4].

В результате проведенного анализа современного уровня авиастроения установлено, что применение конвейерной сборки является перспективным направлением для оптимизации технологических процессов сборки. Однако на сегодняшний день конвейерной сборки подвержены только операции агрегатной и окончательной сборки планера.

В связи с вышеизложенным перспективным является повышение эффективности и сокращение сроков выпуска за счет применения автоматизированной сборки в условиях компьютерно-интегрированных технологий роботизированных систем с учетом объема выпуска изделий.

КОНЦЕПЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В рамках проведенных исследований [2] разработан подход к конструктивно-технологичес-

кому членению самолета, который предполагает выполнять членение в две стадии — *предварительной* и *окончательной*. На предварительной стадии проводится членение с учетом особенностей проектирования самолета и выполнения конструкторских работ в специализированных бригадах, а также из условия обеспечения наилучших эксплуатационных свойств. Окончательное членение предполагает учет особенностей применения роботизированных систем при автоматизированной сборке.

Расчлененность конструкции планера самолета на составные части описывается схемами членения, которые в свою очередь могут быть представлены в виде графа:

$$G^j = (A^j, C^j), \quad (1)$$

где $A_i^j = (A_i^I, A_i^{II}, \dots, A_k^{II}, A_l^{III}, \dots, A_m^N)$ — множество входящих элементов конструкции.

А состав дуг равен

$$C^J \ni c_{i(j)} = \begin{cases} 1, \text{ если } A_i^j \ni A_j^{j+1} \\ 0, \text{ в противном случае } \end{cases}, \quad (2)$$

или

$$C^J \ni c_{j(i)} = \begin{cases} 1, \text{ если } A_i^j \ni A_j^{j+1} \\ 0, \text{ в противном случае } \end{cases}. \quad (3)$$

Соответственно граф $G^j = (A^j, C^j)$ в первом случае характеризует декомпозицию (расчленение) объекта А на входящие в него структурные элементы и композицию (агрегатирование объекта А). Взаимосвязь элементов конструкции можно описать, используя также матрицу смежности вершин графа. Так, для графа $G = (A, C)$ получаем

$$\|c_{i(j)}\|_A = |A \times A| = \begin{matrix} a_1 & a_2 & \dots & a_n \\ \begin{bmatrix} c_{1(1)} & c_{1(2)} & \dots & c_{1(n)} \\ c_{2(1)} & c_{2(2)} & \dots & c_{2(n)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{n(1)} & c_{n(2)} & \dots & c_{n(n)} \end{bmatrix} & \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_n \end{matrix} \end{matrix}. \quad (4)$$

Конструктивно-технологические свойства изделия описываются как контуры. Состав контуров сборочной единицы А представляют как

множество $F(A)$, а составы контуров ее элементов — как множества $F(a_i) \subset F(A)$. Составы контуров всех элементов можно описать с помощью матрицы контуров СЕ:

$$\|c_{i(j)}\|_{A, F(A)} = |A \times A| = \begin{matrix} F_1 & F_2 & \dots & F_m \\ \begin{bmatrix} c_{1(1)} & c_{1(2)} & \dots & c_{1(m)} \\ c_{2(1)} & c_{2(2)} & \dots & c_{2(m)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{n(1)} & c_{n(2)} & \dots & c_{n(m)} \end{bmatrix} & \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_n \end{matrix} \end{matrix}. \quad (5)$$

Здесь $c_i(j) = 1$, если a_i имеет контур F_j ($F_j \in F(a_i)$). Каждый контур F_i характеризуется множеством параметров M_i , имеющих определенные числовые значения. Известно, что необходимое качество контура будет обеспечено только в том случае, если для каждого параметра $m_j \in M_i$ погрешности не выходят за пределы поля допуска. Таким образом, состояние контура F_i может быть определено переменной:

$$F_i = \begin{cases} 1, \text{ если } \forall m_j \in M_i (\omega_j \subseteq \Delta_j) \\ 0, \text{ если } \exists m_j \in M_i (\omega_j \setminus \Delta_j) = \emptyset \end{cases}, \quad (6)$$

где ω_j — поле рассеяния погрешностей параметра m_j ; Δ_j — поле допуска параметра m_j .

По конструктивно-технологическим признакам сборочные единицы объединены в узлы, панели, секции, отсеки и агрегаты. Такой подход позволяет разработать технологические процессы (ТП) и автоматизированные участки для сборки узлов и панелей, которые сходны по конструктивно-технологическим признакам. Применение на сборочных операциях автоматизированных и роботизированных участков позволяет разрабатывать типовые ТП и схемы сборки на обобщенные комплексные сборочные единицы, а также создать новые средства увязки. Это позволяет сократить время подготовки производства и является одним из наиболее рациональных способов оптимизации ТП в сборке.

Очевидно, что применение существующих методов сборки в условиях современного развития компьютерных технологий и при автоматизированной сборке является нецелесооб-

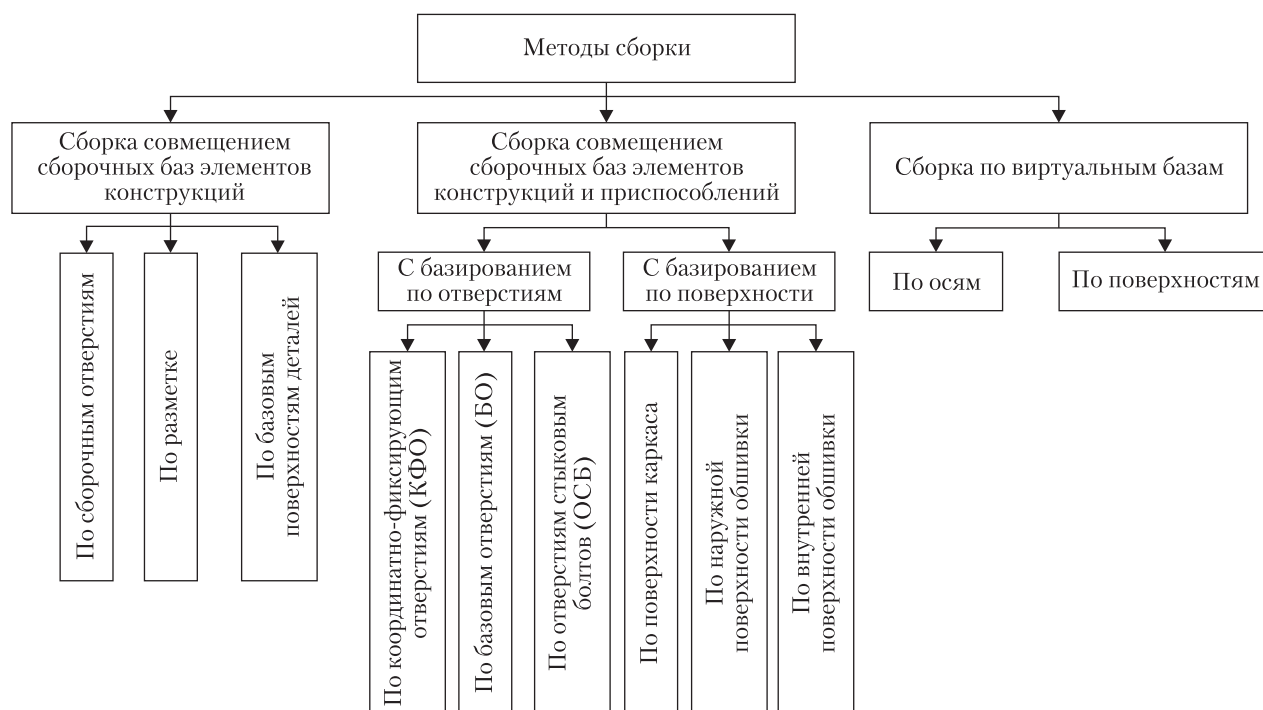


Рис. 3. Методы сборки, применяемые в самолетостроении

разным, поэтому предлагается новый метод сборки — *сборка по виртуальным базам* или *метод виртуальных баз* [5].

Суть этого метода сборки заключается в том, что базирование деталей относительно друг друга или относительно элементов сборочного приспособления происходит по электронному макету сборочной единицы с помощью робота-манипулятора (рис. 3). Например, сборка по виртуальным базам для узлов состоит из следующих основных операций:

1) захват роботом деталей и определение их положения в пространстве (сканирование и другие способы определения размеров детали) при необходимости возврата деталей после контроля на доработку;

2) установка деталей в требуемое положение относительно друг друга или относительно элементов приспособления по электронному макету сборочной единицы;

3) фиксация деталей в сборочном положении;

4) удержание деталей в сборочном положении;

5) соединение деталей между собой различными способами: заклепками, болтами, сваркой, пайкой, склеиванием.

Фиксация установленных деталей осуществляется либо с помощью специальных фиксаторов, либо удерживается роботом до соединения деталей.

В общем виде типовая схема укрупненного технологического процесса автоматизированной конвейерной сборки может быть представлена в виде уравнения

$$P = [УФ(a_{i_1}), УФ(a_{i_1}), C_{i_1 i_2}, \dots, УФ(a_{i_{n-1}}), УФ(a_{i_n}), C_{i_{n-1} i_n}), B, У, K], \quad (7)$$

где P — технологический процесс; $a_{i_1}, a_{i_2}, a_{i_n}$ — последовательность установки деталей; $УФ$ — содержание операций установки и фиксации (расфиксация); C — содержание операций соединения; B — содержание операций возврата; $У$ — содержание операций удержания; K — содержание контрольных операций.

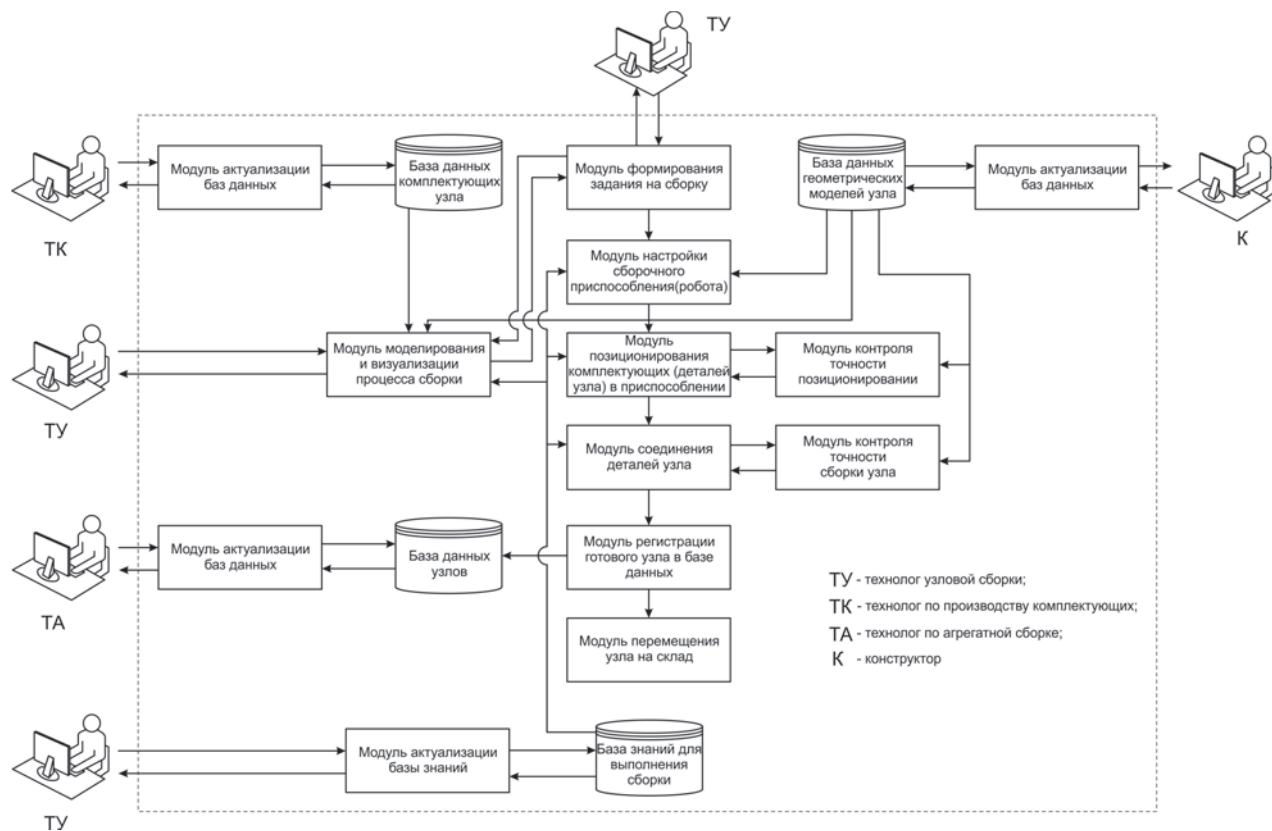


Рис. 4. Структура программного обеспечения

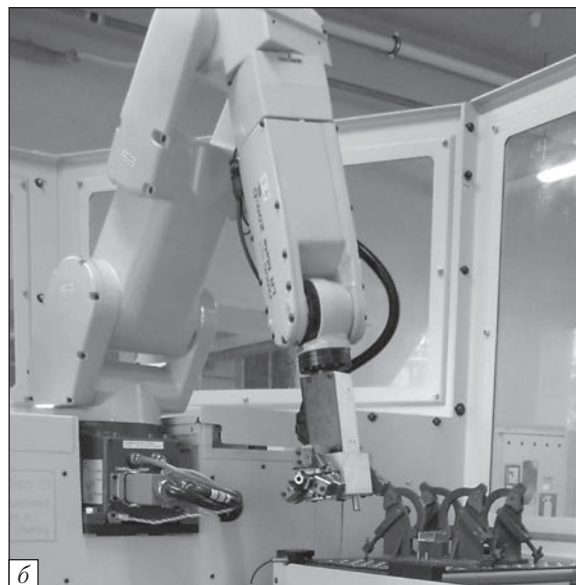


Рис. 5. Апробация программного обеспечения с помощью робота Fanuc LR Mate 200: а – установка пояса нервюры; б – собранный узел (нервюра)

В работе [2] проведен сравнительный анализ точности сборки узлов по обводам для различных вариантов применяемых методов увязки. В результате расчетов было установлено, что погрешность сборки узла при программно-инструментальном методе с применением специализированных переналаживаемых приспособлений с ЧПУ по сравнению с традиционным методом увязки будет меньше примерно на 64 %.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СБОРКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

На основе сформированных в работе [2] алгоритмов разработано программное обеспечение, обеспечивающее визуализацию сборочного процесса. Структура программного обеспечения представлена на рис. 4.

В работах [6, 7] рассмотрены архитектура программных модулей, структура баз данных и знаний разработанной информационной системы, а также проиллюстрирована возможность применения метода сборки по виртуальным базам для повышения эффективности сборочных процессов панелей и узлов самолета. Приведены фрагменты программной реализации систем визуализации процесса сборки и апробация программного обеспечения с помощью робота Fanuc LR Mate 200 (рис. 5).

Для определения суммарной погрешности при исследовании точности позиционирования специализированного переналаживаемого приспособления с ЧПУ используют вероятностно-статистический метод, поскольку погрешность настраиваемого переналаживаемого приспособления с ЧПУ зависит от погрешностей шагового двигателя, изготовления выдвигных штырей, линейной и круговой интерполяции.

В работе [2] была проведена оценка точности позиционирования специализированного переналаживаемого приспособления с ЧПУ, в результате которой установлено, что данное приспособление имеет четырехкратный гарантированный запас точности для ко-

ординированного позиционирования установочных элементов.

ВЫВОДЫ

1. На основании анализа тенденций развития современных технологий сборки авиационных конструкций определены направления автоматизации и роботизации сборочного производства, что позволило сформировать концепцию автоматизированной сборки авиационных конструкций.

2. Предложен метод сборки по виртуальным базам с использованием СПП с ЧПУ и робототехнических систем для авиационного производства, что дает возможность в автоматизированном режиме проводить сборку авиационных конструкций.

3. Предложен подход к автоматизации участка сборки самолетостроительного предприятия с использованием робототехнической системы на основе интеллектуальных роботов-сборщиков, что позволяет обеспечить стабильность сборочных процессов.

4. Разработано программное обеспечение для визуализации процессов автоматизированной сборки, что дает возможность в реальном времени контролировать процесс автоматизированной сборки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кривцов В.С., Воробьев Ю.А., Воронько В.В., Зайцев В.Е.* Метод автоматизированной конвейерной сборки планера самолета // Сб. науч. трудов «Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии» / Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». — Харьков, 2012. — Вып. 55. — С. 5—13.
2. *Воронько В.В.* Научные основы автоматизированной сборки авиационных конструкций в условиях опытного и единичного производства [Текст]: дис. ... доктора тех. наук: 05.07.02. — Харьков, 2014. — 306 с.
3. *Воронько В.В., Шостак И.В.* Представление знаний в моделях мира интеллекту // Авиационно-космическая техника и технология. — 2013. — № 1 (98). — С. 102—107.
4. *Воронько В.В., Воробьев Ю.А., Корнилов Л.Н., Воронько И.А.* Особенности подготовки самолетостроительного производства за рубежом // Зб. наук. пр. «Системи

- управління, навігації та зв'язку» / ДП «ЦНДІ навігації і упр.». — К., 2012. — Вип. 4 (24). — С. 29–39.
5. Воронько В.В., Вороб'єв Ю.А., Григоренко О.В. Нечеткая модель формирования виртуальных баз роботоманипулятором при конвейерной сборке планера самолета // Зб. наук. пр. «Системы обработки информации» / М-во оборони України, Харк. ун-т повітр. сил ім. Івана Кожедуба. — Харків, 2012. — Вип. 7 (105). — С. 64–68.
 6. Воронько В.В. Концепция создания программного обеспечения для визуализации процессов сборки плоских узлов планера самолета // Авиационно-космическая техника и технология. — 2013. — № 2 (99). — С. 21–24.
 7. Воронько В.В., Вороб'єв Ю.А., Шевель В.В., Профатилова А.С. Программное обеспечение компьютерной визуализации процесса автоматизированной сборки плоских узлов планера самолета // Сб. науч. тр. «Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии» / М-во образования и науки, молодежи и спорта Украины, Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». — Харьков, 2013. — Вып. 60. — С. 93–99.

REFERENCES

1. Kryvcov V.S., Vorob'ev Ju.A., Voron'ko V.V., Zajcev V.E. *Metod avtomatyzirovannoj konvejernoj sborky planera samoleta*. Sb. nauch. trudov «Открытие информационные и компьютерные интегрированные технологии». Нас. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «НАУ». Har'kov, 2012, Vyp. 55: 5–13 [in Russian].
2. Voron'ko V.V. *Nauchnie osnovi avtomatyzirovannoj sborky avyacyonnyh konstrukcij v uslovijah opitnogo y edynichnogo proizvodstva*. dys. ... doktora teh. nauk: 05.07.02. Har'kov, 2014 [in Russian].
3. Voron'ko V.V., Shostak Y.V. *Avyacyonno-kosmycheskaja tehnika y tehnologija*. 2013, N1(98): 102–107 [in Russian].
4. Voron'ko V.V., Vorob'ev Ju.A., Kornjlov L.N., Voron'ko Y.A. *Osobennosty podgotovky samoletostroytel'nogo proizvodstva za rubezhom*. Zb. nauk. pr. Systemy upravlinnja, navigacii' ta zv'jazku. DP «CNDI navigacii' i upr.». Kyiv, 2012, Vyp. 4 (24): 29–39 [in Russian].
5. Voron'ko V.V., Vorob'ev Ju.A., Grygorenko O.V. *Nechetkaja model' formirovanija virtual'nyh baz robotomani-puljatorom pry konvejernoj sborkе planera samoleta*. Zb. nauk. pr. «Systemy obrobky informacii'». M-vo obrony Ukrainy, Hark. un-t povitr. syl im. Ivana Kozheduba. Harkiv, 2012, Vyp. 7 (105): 64–68 [in Russian].
6. Voron'ko V.V. *Avyacyonno-kosmycheskaja tehnika y tehnologija*. 2013, N2 (99): 21–24 [in Russian].
7. Voron'ko V.V., Vorob'ev Ju.A., Shevel' V.V., Profatylova A.S. *Programmnoe obespechenie komp'juternoj vizualizaciyu processa avtomatyzirovannoj sborky ploskyh uzlov planera samoleta*. Sb. nauch. tr. «Открытие информационные и компьютерные интегрированные технологии». М-во образования и науки, молодежи и спорта Украины, Нас. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «НАУ». Har'kov, 2013, Vyp. 60: 93–99 [in Russian].

В.С. Кривцов, В.В. Воронько, В.Е. Зайцев

Національний аерокосмічний університет
ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харків

СУЧАСНІ ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЇ СКЛАДАННЯ АВІАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ

На підставі виконаних теоретичних досліджень за допомогою методу віртуальних баз створено концепцію автоматизованого складання авіаційних конструкцій, спеціалізованих переналагоджуваних пристроїв з ЧПК та робототехнічних систем. Обґрунтовано принципи автоматизації складання літакобудівного підприємства з використанням робототехнічної системи

Ключові слова: автоматизоване складальне виробництво, робототехнічні системи, спеціалізовані переналагоджувані пристосування з числовим програмним керуванням, метод віртуальних баз.

V.S. Krivtsov, V.V. Voronko, V.Ye. Zaytsev

M.Je. Zhukovskogo Natsionalny aэрокосmichny
universitet «HAI», Kharkiv

ADVANCED PROSPECTS FOR DEVELOPMENT OF AIRCRAFT ASSEMBLY TECHNOLOGY

On the basis of theoretical studies carried out by the method of virtual bases the concept of automated assembly of aircraft structures, specialized readjustable devices with CNC and robotic systems was created. The principles of automated assembly of aircraft manufacturing enterprise using robotic system are proved.

Keywords: automated assembly production, robotic systems, specialized readjustable devices with CNC, method of virtual bases.

Стаття надійшла до редакції 10.12.14