

М 421770

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР
МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ
УЧИЛИЩЕ им. Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи

Алексеев Алексей Владимирович

УДК. 621.757 - 52

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ
РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИ-
ТЕЛЬНОСТИ И ОБЕСЛЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

Специальность 05.02.08 - Технологии машиностроения

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 1984 г.

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - Заслуженный деятель науки
и техники РСФСР, доктор
технических наук, профессор
КОРСАКОВ В.С.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор СЯРОВАТЧЕНКО П.В.
- кандидат технических наук,
с.н.с. ФОМИН А.В.

Ведущее предприятие - МНПО "ТЕМП" г. Москва

Защита состоится "18" июня 1984 г. на заседании
специализированного Совета по технологии машиностроения
К 053.15.15 МВТУ им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва,

г. Москва, МВТУ им.

ном экземпляре, заверенный
по указанному адресу.

июнь 1984 г.

и.и.и. Р.К.МЕЩЕРЯКОВ

Объем 1 п.л. Тираж 100 экз.
г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5

МН21770

Актуальность темы. В настоящее время сборочные работы в машино- и приборостроении составляют до 50 % трудоемкости изготовления изделий. Уровень автоматизации сборочных работ значительно ниже уровня автоматизации на операциях обработки. Около 90 % сборочных работ в промышленности выполняется вручную и с использованием механизированного инструмента и только 10 % - на полуавтоматах, автоматах и автоматических линиях, в том числе с применением промышленных роботов (ПР).

До 50 % всех соединений в машинах и приборах составляют разъёмные резьбовые соединения (РС), из них на долю винтовых приходится около 70 %. Операции сборки РС выполняются в большинстве случаев вручную. Они трудоемки и утомительны для сборщиков. В перспективе удельный вес РС сократится, но общий объем останется значительным.

Перспективным средством автоматизации сборки в условиях гибкого автоматизированного производства (ГАП) являются ПР. Создание высокопроизводительных сборочных ГАП является частью стратегической задачи комплексной автоматизации промышленного производства, поставленной партией и правительством перед советской наукой и техникой.

Конструктора и технологи при разработке и внедрении сборочных ПР, средств их оснащения и технологии сталкиваются со сложными, зачастую нерешенными проблемами. Этим определяется отсутствие удовлетворительных по технологическим возможностям ПР, средств их оснащения и методики проектирования технологии роботизированной сборки, в том числе РС.

В связи с изложенным, исследование технологии роботизированной сборки РС является важной и актуальной задачей, решение которой поможет конструкторам и технологам создавать высокопроизводительные сборочные ГАП на основе ПР и технологические процессы, обеспечивающие качественную сборку изделий.

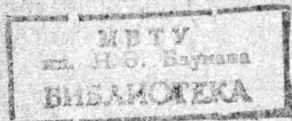
Цель работы - повышение производительности и обеспечение качества роботизированной сборки РС на основе изучения ее закономерностей и создание средств оснащения, обеспечивающих безотказную сборку изделий.

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1421770

Алексеев А.В. Исследование



Методы исследований. Исследования технологического процесса роботизированной сборки РС выполнены расчетно-аналитическими и экспериментальными методами. Математическое описание связей параметров этапов изучаемого процесса получено с помощью аппарата аналитической геометрии, алгебры, классической механики, теории обыкновенных дифференциальных уравнений и численных методов их решения и органически связано с основными положениями технологии машиностроения. Численное моделирование динамики этапов процесса сборки и расчеты точности позиционирования ПР и параметров механизма компенсации сборочных погрешностей проводились на ЭВМ ЕС-1033. Проведены экспериментальные исследования с использованием современной контрольно-регистрирующей аппаратуры на специальной экспериментальной установке. Эксперименты проводились с образцами и промышленными изделиями. Изучалась сборка РС с применением обычных и самонарезающих винтов.

Научная новизна. 1/ Выявлены закономерности протекания процесса роботизированной сборки РС во времени. Динамические модели этапов процесса впервые позволяют установить четкую количественную взаимосвязь размеров деталей, размеров и жесткостей технологической оснастки, точности позиционирования ПР и режимов сборки. Модели позволяют научно обоснованно рассчитывать режимы сборки, параметры технологической оснастки и ПР для РС любых размеров. 2/ Получены аналитические зависимости для расчета производительности ПР для сборки РС, позволяющие выбрать удовлетворительную по производительности структуру процесса. 3/ Установлена связь между погрешностями относительного положения деталей и инструмента и качеством выполнения сборки, характеризующим степень соответствия момента затяжки заданному и неповреждением деталей. Доказана возможность обеспечения качества сборки РС в широком диапазоне линейных и угловых погрешностей положения крепежной и соединяемых деталей при оснащении ПР оригинальным компенсирующим механизмом.

Практическая ценность. Практическую ценность работы представляют:

1. Научно обоснованная методика проектирования технологии роботизированной сборки РС.

2. Динамические математические модели этапов процесса сборки, позволяющие быстро производить автоматизированный расчет условий обеспечения безотказной сборки РС, параметров средств

технологического оснащения, режимов сборки, сборочных ПР для соединений с гарантированным зазором любого типоразмера.

3. Рекомендации по технологическому обеспечению качества и безотказности сборки РС, содержащих обычные и самонарезающие винты. Оригинальное устройство оснащения ПР для сборки РС, другие устройства оснащения ПР, расширяющие их технологические возможности.

4. Рекомендации по организации структуры и компоновки на основе модульного принципа сборочных участков ГАП, обеспечивающих высокопроизводительную качественную сборку РС.

Реализация работы. Результаты работы в виде методики проектирования технологии роботизированной сборки РС, средств оснащения и технического задания на роботизированный комплекс сборки РС переданы МНПО "ТЕМП" г. Москва для проведения проектно-конструкторских работ. Они использованы также при разработке по договорам о содружестве проекта робототехнического комплекса сборки для Московского завода АТЭ им. 60-летия Октября и технического задания и рабочих чертежей для роботизированного комплекса сборки насоса гидросилителя руля автомобиля ЗИЛ-130 для ПО АвтоЗИЛ.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на: всесоюзной научно-технической конференции "Проблемные вопросы автоматизации производства", Краснодар, 1981г.; республиканском совещании "Механизация и автоматизация ручных и трудоемких работ в машиностроении", Ижевск, 1981г.; всесоюзном научно-техническом семинаре "Опыт разработки и внедрения автоматических манипуляторов и технологических комплексов с их использованием", Москва, 1982 г.; научно-технической конференции "Применение манипуляторов и промышленных роботов", Москва, 1982 г.; всесоюзном научно-техническом семинаре "Опыт разработки и внедрения передовых технологических решений в области сборочного производства на предприятиях Минсельхозмаша", Павлодар, 1982 г.; научно-технической конференции "Промышленные роботы и АСУ роботизированным производством", Одесса, 1982 г.; республиканской научно-технической конференции "Состояние и перспективы применения вычислительной техники в машиностроительной промышленности Узбекистана", Ташкент, 1982 г.; республиканской научно-технической конференции "Повышение эффективности производства механизацией и автоматизацией межсборочных и вспомогательных процессов в машиностроении с применением промышленных роботов и манипуляторов".

Ташкент, 1983 г.; республиканском научно-практическом семинаре "Автоматизация процессов подготовки производства в машиностроении", Фрунзе, 1983 г.; научном семинаре кафедры АМ-3 МВТУ им. Н.Э.Баумана, 1984 г.

Публикации. Материал диссертации отражен в 7 публикациях. Получено 2 положительных решения на изобретения.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, общих выводов, изложенных на 148 страницах машинописного текста. Работа содержит 114 рисунков, 11 таблиц, приложения на 24 страницах и список литературы из 94 наименований.

В первой главе содержится обзор и анализ состояния вопроса автоматизации сборки РС и сборочных работ с использованием ПР по опубликованным в научной литературе исследованиям и практическим реализациям в промышленности, на основании чего сделаны выводы: 1/ накоплен большой опыт в исследовании и промышленной реализации автоматической сборки РС в массовом производстве; 2/ ПР являются необходимым элементом автоматизации сборки в условиях ГАП; 3/ отсутствует информация о практическом применении ПР для сборки РС, необходимые рекомендации по обеспечению их качественной, безотказной и высокопроизводительной роботизированной сборки, что объясняется сложностью задачи, отсутствием специальных сборочных ПР с удовлетворительными характеристиками и неохотой исследователей роботизированной сборки РС.

Проведен сравнительный анализ структур технологического процесса сборки РС по циклограммам. Рассмотрены шесть основных структурных схем сборки РС. Наименьшей производительностью обладают структуры с последовательной установкой деталей и заменой одношпиндельного инструмента и схватов. Структуры с совмещением рабочих и холостых ходов, параллельной установкой нескольких винтов обладают большей в К раз производительностью, где К - число одновременно устанавливаемых винтов. Основные цикловые потери приходится на транспортные переходы. Наиболее производительны структуры, оснащенные комплексами ориентации и подачи винтов при переходах к следующей крепежной точке или изделию. Путем оптимизации переходов и совмещения ходов достигается повышение производительности на 25-50%. В соответствии с результатами анализа и целью исследований необходимо было решить следующие задачи: 1/ проанализировать условия роботизированной сборки РС и выявить специфику требований к ПР; 2/ провести ан

лиз погрешностей и условий обеспечения безотказной роботизированной сборки РС; 3/ аналитически исследовать этапы процесса сборки РС в динамике с целью определения параметров процесса, ПР и средств его оснащения, обеспечивающих безотказную сборку; 4/ экспериментально проверить аналитические исследования и получить дополнительные данные для определения влияния на качество соединения технологических факторов и сборочных погрешностей при установке в изделия обычных и самонарезающих винтов на роботизированном комплексе; 5/ разработать на основании исследований конструкции механизмов оснащения ПР, обеспечивающих безотказную высокопроизводительную сборку РС; 6/ разработать методику проектирования технологии роботизированной сборки РС.

Во второй главе содержится анализ условий роботизированной сборки РС и специфики требований к ПР и оснастке. Установлена зависимость структуры процесса сборки от характеристик изделий и соединений. На основе анализа характеристик изделий и РС даны рекомендации по технологичности конструкций изделий и выбору канематической структуры ПР. Приведены примеры возможных компоновок роботизированных комплексов (РК) сборки РС и описание их работы. Приведена последовательность проектирования технологии роботизированной сборки, состоящая из этапов: формирования входных данных; анализа входных данных; расчетов и анализа выходных данных; технико-экономических расчетов и сравнения вариантов процессов сборки по абсолютным и относительным критериям. Основным абсолютным критерием, наряду с производительностью, является технологическая себестоимость, определяемая для ГАИ

$$C_{Aij} = \sum_{k=1}^m S_M^{CP} t_{шj}^k + \sum_{p=1}^q T_{пзj}^p \ell_n + N_j^{-1} \sum_{p=1}^q T_{ппj}^p \ell_n, \quad (1)$$

где S_M^{CP} - средняя стоимость 1 мин. работы РК /ячейки ГАИ/; $S_M^{CP} = m^{-1} \sum_{k=1}^m S_k$, где S_k - стоимость k-ой ячейки, m - число ячеек; $t_{шj}^k$ - штучное время на k-ой операции; $T_{пзj}^p$ - подготовительно-заключительное время, отнесенное к одному изделию на одну операцию; ℓ_n - минутная зарплата наладчика; N_j - программа выпуска j-го изделия; $T_{ппj}^p$ - время подготовки программы для p-ой единицы перенастраиваемого оборудования; ℓ_n - минутная ставка программиста. При интерактивном режиме контроля технологическая себестоимость определяется

$$C_{интj} = \sum_{k=1}^m S_M^{CP} t_{шj}^k + N_j^{-1} \sum_{p=1}^q T_{пзj}^p \ell_n + \sum_{p=1}^q T_{пзj}^p \ell_n + \frac{\sum_{k=1}^m t_{шj}^k}{m \cdot a} \ell_a, \quad (2)$$

где δ_d - минутная ставка диспетчера; $T_{из}^p$ - подготовительно-заключительное время, отнесенное к одному изделию на одну операцию без учета работ по замене программ, осуществляемой диспетчером; a - количество одновременно обслуживаемых диспетчером линий.

Проведен анализ погрешностей и условий автоматической сборки РС и дано выражение суммарной векторной относительной погрешности расположения i -го винта и i -го отверстия в партии из j собираемых изделий с n крепежными точками:

$$\bar{\Delta}_{\Sigma i}^j = \bar{\Delta}_{пр}^j + \bar{\Delta}_{из i}^j - (\bar{\Delta}_{н i}^j + \bar{r}_t^j + \bar{\Delta}_{з i}^j), \quad (3)$$

где $\bar{\Delta}_{пр}^j$ - погрешность приспособления; $\bar{\Delta}_{из i}^j$ - погрешность выполнения межосевых расстояний; $\bar{\Delta}_{н i}^j$ - погрешность настройки ПР по первому изделию для i -ой крепежной точки; $\bar{r}_t^j$ - погрешность выхода ПР в i -ю точку при сборке j -го изделия; $\bar{\Delta}_{з i}^j$ - погрешность базирования i -го винта в завертывающей машине. Максимальная погрешность равна сумме максимальных погрешностей

$$|\bar{\Delta}_{\Sigma i}^j|_{\max} = |\bar{\Delta}_{пр}^j|_{\max} + |\bar{\Delta}_{из i}^j|_{\max} + |\bar{\Delta}_{н i}^j|_{\max} + |\bar{r}_t^j|_{\max} + |\bar{\Delta}_{з i}^j|_{\max}. \quad (4)$$

Безотказная жесткая сборка невозможна при условии

$$|\bar{r}_{s \min}^j| \leq |\bar{\Delta}_{\Sigma i}^j|_{\max}, \quad (5)$$

где $|\bar{r}_{s \min}^j|$ - половина минимального зазора между винтом и отверстием j -го изделия. На основании расчетов сформулировано условие обеспечения безотказной сборки деталей с гарантированным зазором на этапе поиска при стационарной и подвижной сборке

$$Q' \subset (SUP_P), \quad (6)$$

где Q' - область устойчивого действия механизмов компенсации и механизмов с обратной связью; S - область существования зазора; P_s - область существования центров торца ножки винта. Для обеспечения надежной компенсации область Q' должна перекрывать объединение областей S и P_s не менее, чем на 10%. По данной методике оценивается возможность жесткой сборки, а при ее невозможности диапазон надежной работы устройств компенсации, и назначаются нормы точности изготовления элементов РК для процессов любой структуры. На этом этапе происходит уточнение структуры.

В третьей главе разработаны динамические модели этапов процесса сборки на основе изучения закономерностей их протекания во времени. Проведен анализ геометрических условий безотказной сборки по этапам. На этапе прохождения винтом отверстия возможна установка винта в отверстие на три точки, что характеризует зак-

ливание при любых скоростях совмещения. Критические значения угла θ наклона и глубины ℓ введения винта, превышение которых приводит к трехточечному контакту, определяется

$$\theta_{кр} = \arccos(r/R) \quad (7)$$

$$\ell_{кр} = \frac{2(R^2 - r^2)}{\sqrt{R^2 - r^2}} \quad (8)$$

где R - радиус отверстия; r - радиус винта. Приведены графики определения критических параметров в зависимости от относительного зазора между винтом и отверстием. Определена область существования траекторий характерной точки схвата ПР, в которой обеспечивается безотказное совмещение. Геометрический анализ этапа наживления резьбы показал, что неполнопрофильная резьба с зазорами имеет значительный сектор наживления, в котором угол наживления изменяется от 0,5 до 5°. Для безотказного наживления винту и инструменту необходимо обеспечить ограниченную свободу по шести степеням. Соблюдение геометрических условий необходимо, но недостаточно для безотказной сборки. Сформулированы и решены динамические задачи наиболее ответственных этапов сборки РС - поиска и совмещения. Задачи решались с помощью уравнений Лагранжа первого рода.

Задача поиска имеет замкнутое гиперболическое решение. Траектория движения центра торца ножки винта в плоскости поверхности соединяемых деталей имеет вид

$$y = \frac{y_0 [f(z) + \operatorname{tg} \alpha \cdot k/m(1+f(z))] + j_0 V_0 k/m [\ln(f(z) + \sqrt{f^2(z)-1}) - \sqrt{f^2(z)-1}]}{1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot k/m \cdot [1+f(z)]} \quad (9)$$

где $k = (1/\cos^2 \alpha + f/(1 - \operatorname{tg} \alpha / \cos^2 \alpha - f))$

$$m = j_n(1 + f \cdot \operatorname{tg} \alpha / (1 - \operatorname{tg} \alpha / \cos^2 \alpha - f))$$

$$f(z) = \frac{2z j_n r + \omega m_B R_{cp}^2}{2z_0 j_n r + \omega m_B R_{cp}^2}$$

α - угол наклона винта к плоскости присоединяемой детали; j_n - жесткость инструмента в плоскости YOZ; f - коэффициент трения винта о поверхность детали; y_0, z_0 - начальные координаты центра торца ножки винта; ω - скорость вращения винта; V_0 - скорость сборки; j_0 - жесткость инструмента по оси сборки; m - масса системы; m_B - масса вращающейся части системы; R_{cp} - средний радиус вращающейся части; r - радиус винта.

Время поиска рассчитывается по формуле

$$t = \ln \left(\frac{z + b/a}{z_0 + b/a} + \sqrt{\left(\frac{z + b/a}{z_0 + b/a} \right)^2 - 1} \right) \quad (10)$$

где $a = j_n/m$; $b = \omega m_B R_{cp}^2 / 2m$.

При частоте вращения винта $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ время поиска не превышает 0,1 с. при исходных смещениях от центра отверстия 5 мм.

Задача совмещения представляется системой обыкновенных дифференциальных уравнений в форме Коши

$$\begin{aligned}\dot{Y}_1 &= Q_x/M - F \cdot RB/M; \quad \dot{Y}_2 = Y_1; \\ \dot{Y}_3 &= Q_y/M + E \cdot RB/M; \quad \dot{Y}_4 = Y_3; \\ \dot{Y}_5 &= Q_\theta/I + P/I \cdot (RB); \quad \dot{Y}_6 = Y_5,\end{aligned}\quad (II)$$

где Q_x, Q_y, Q_θ — обобщенные силы системы по координатам; RB — реакция в системе со стороны соединяемой детали; M — масса инструмента с деталью; $\dot{x} = Y_1, \dot{y} = Y_3, \dot{\theta} = Y_5, x = Y_2, y = Y_4, \theta = Y_6$, где x, y, θ — текущие координаты характерной точки схвата-инструмента.

$$\begin{aligned}RB &= -M \left(\frac{Q_y}{M} + \frac{Q_x E}{MF} + \frac{AB \cdot Q_\theta}{2I} + \frac{AB \cdot Q_x \cdot P}{2I \cdot E} + \frac{(Y_5)^2 \cdot CD}{2} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{Y_1 \cdot Y_5}{\cos^2 Y_6} \right) \cdot \left(-\frac{F \cdot t \cdot Y_6}{2} + \frac{M \cdot AB \cdot P}{2I} + E \right) + \frac{Q_x}{F};\end{aligned}\quad (I2)$$

$$\begin{aligned}Q_x &= C_1 (V_0 t \cos \gamma_0 - (Y_2 - Y_0) \cos^2 \gamma_0 - (Y_4 - Y_0) \cos \gamma_0 \sin \gamma_0 + A_1 \cos \gamma_0) + \\ &\quad + (C_2 + C_3) (A_2 \sin \gamma_0 + V_0 t \sin \gamma_0 \cos^2 \gamma_0 - (Y_4 - Y_0) \sin \gamma_0 \cos \gamma_0 - (Y_2 - \\ &\quad - Y_0) \sin^2 \gamma_0) + Mg \cos \alpha_0;\end{aligned}\quad (I3)$$

$$\begin{aligned}Q_y &= C_1 (V_0 t \sin \gamma_0 - (Y_2 - Y_0) \cos \gamma_0 \sin \gamma_0 - (Y_4 - Y_0) \sin^2 \gamma_0 + A_1 \sin \gamma_0) - (C_2 + C_3) \cdot \\ &\quad (A_2 \cos \gamma_0 - (Y_2 - Y_0) \sin \gamma_0 \cos \gamma_0 - (Y_4 - Y_0) \cos^2 \gamma_0 + V_0 t \sin \gamma_0 \cos^2 \gamma_0) + Mg \sin \alpha_0;\end{aligned}\quad (I4)$$

$$Q_\theta = (C_4 + C_5) (\gamma_0 - Y_6 + A_3) - Mg \sin(\alpha_0 + Y_6) \cdot (H - \ell),\quad (I5)$$

где C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 — жесткости связей схвата с рукой ПР; I — момент инерции схвата с деталью относительно характерной точки схвата; ℓ — длина системы схват — деталь до центра масс; H — расстояние от торца винта до характерной точки схвата; R — радиус отверстия; α_0 — угол наклона вектора силы тяжести схвата к оси X присоединяемой детали; γ_0 — угол наклона оси кисти ПР к оси схвата; t — время; $g = 9807 \text{ мм/с}^2$ — ускорение свободного падения. Здесь $E = f \sin Y_6 - 2 \cos Y_6$,

$$F = \sin Y_6 + 2f \cos Y_6,$$

$$P = -AB \cos Y_6 + f \cdot r - f \cos Y_6 \cdot Y_4,$$

$$AB = \frac{B \cdot \cos(\delta + Y_6) + 2r \sin Y_6 + Y_2}{\cos^2 Y_6} - 2H \cos Y_6 - t \gamma Y_6 (\sin(\delta + Y_6) \cdot B -$$

$$\begin{aligned}& - 2r \cos Y_6) \cdot \\ & CD = 2H \sin Y_6 + \frac{2}{\cos^2 Y_6} [2r \cos Y_6 - B \sin(\delta + Y_6)] + \frac{2t \gamma Y_6}{\cos^2 Y_6} \cdot \\ & \times [B \cos(\delta + Y_6) + 2r \sin Y_6 + Y_2] - t \gamma Y_6 [\cos(\delta + Y_6) B + 2r \sin Y_6],\end{aligned}$$

где $\delta = \arccos(r/H)$; $B = \sqrt{H^2 + r^2}$; A_1, A_2, A_3 — перемещения характерной точки по координатам, полученные при поиске.

Задача совмещения неразрешима в замкнутом виде. Численное решение на ЭВМ стандартными программами невозможно, так как задача совмещения описывается жесткими дифференциальными уравнениями. Жесткость задачи объясняется соотношением перемещений характерной точки схвата по координатам, достигающим величин 10^4 и более. На основании анализа численных методов решения жестких обыкновенных дифференциальных уравнений выбран неявный многошаговый переменного порядка метод Гира интегрирования этих уравнений. Разработана программа моделирования процесса совмещения "РОБОТ" на ЭВМ, использующая известную подпрограмму интегрирования дифференциальных уравнений по методу Гира. Расчеты проведены на ЭВМ ЕС-1033. Найдены предельные значения параметров системы, при которых движение выполняется безотказно, то есть без заклинивания, определяемого как явление уменьшения приращения координат характерной точки схвата во времени ниже некоторой наперед заданной величины. Анализ ситуаций проводился по графикам решений, вывод которых обеспечивался подпрограммами GRAF и OUPP.

Приведенные модели позволяют решить две задачи технологии сборки: первую прямую — по известным параметрам соединения и механизма компенсации определить максимально возможную погрешность позиционирования ПР с учетом других погрешностей; вторую обратную — по известной точности позиционирования ПР и параметрам соединения подобрать параметры механизма компенсации. Модели пригодны для расчетов и анализа процесса совмещения любых соединений с зазором любых типоразмеров. Проведены расчеты для условий сборки РС винтами. Зона надежной компенсации на этапе поиска, в которую должен попадать центр торца винта, ограничивается кругом радиуса $d_0/2$, где d_0 — диаметр отверстия, на кромке которого расположен центр этого круга. Для резьб МЗ-М5 скорости сборки при совмещении находятся в пределах 0-50 мм/с и выбираются из условия обеспечения безотказного завинчивания. Жесткости должны быть: C_1 — не менее 60 Н/мм, C_2+C_3 — не более 5 Н/мм и C_4+C_5 — не более 100 Нм/рад. При установке винтов М6 и более жесткости должны быть более высокими, а скорости — меньше. Винтовые соединения МЗ-М5 характеризуются зазорами 0,2 — 0,4 мм или δ_r до 0,05 и для них точность позиционирования ПР на-

ходится в пределах $\pm 2,5$ мм, а центр настройки ПР смещается на кромку отверстия. Приведены графики, построенные по результатам расчетов. Модели позволяют выводить на печать или графопостроитель функции координат, скоростей и ускорений от времени, а также траекторию и фазовые траектории характерной точки схвата и силу реакции как функцию времени. Последнее дает возможность оптимизировать параметры механизма и режимы сборки по критерию ограничения сверху реакции связи, допустимое значение которой выражается из условия неповреждения сопрягаемых деталей. Время счета одной ситуации не более 1 мин.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований роботизированной сборки РС. Проведена проверка полученных на стадии аналитических исследований расчетных значений зоны надежной компенсации, точности позиционирования ПР, режимов сборки, начальных параметров системы и механизма компенсации, обеспечивающих безотказную качественную сборку с заданной производительностью. Проведены исследования, определившие основные конструктивные и технологические факторы, влияющие на безотказность и производительность технологической системы и качество сборки РС.

Исследования проводились на установке, содержащей ПР "Универсал-5" с аналого-позиционной системой управления, на руке которого размещалась винтозавертывающая машина П-188 конструкции ВНИТИ. Прибор с автоматической подачей винтов из комплекса ориентации пневмоимпульсом по гибкой трубке; специальное измерительное приспособление, установленное на универсальном поворотном столе; контрольно-регистрирующую аппаратуру. Измерялись усилия сборки и перемещения по трем декартовым координатам и моменты завинчивания и затяжки с точностью до 5%. Записывались траектории движения винта. Регистрация параметров осуществлялась автоматически самописцем. Эксперименты проводились при установке обычных винтов МЗ-М5 длиной 6 - 30 мм с цилиндрической головкой - ГОСТ 1491 - 80, полукруглой - ГОСТ 17473-80, полупотайной - ГОСТ 17474-80, потайной - ГОСТ 17475-80, а также самонарезающих винтов для металла и пластмассы с различными головками ГОСТ 10616-80... ГОСТ 10621-80, самонарезающих винтов для металла и пластмассы с заостренным концом ГОСТ 10650-80 ... ГОСТ 10652-80 и шурупов по ГОСТ 1144-80. Головки имели прямые и крестообразные шлицы. Винты были с покрытием окисным, медно-ни-

келевым и без покрытия. Собираемые изделия представлены образцами и реальными изделиями из различных материалов. Для определения влияния конструктивных и технологических факторов на безотказность сборки проведены серии одно-двухфакторных экспериментов. Границы безотказности устанавливали, увеличивая значения факторов от наименьшего.

Экспериментально доказана зависимость качества сборки РС от сборочных погрешностей. Наибольшее влияние на отказы при сборке годных изделий оказывают линейные и угловые погрешности положения осей крепежной детали и отверстий собираемых деталей. Жесткая сборка приводит к 100%-ным отказам при раздельном влиянии погрешностей $\Delta_z \geq 1$ мм и $\Delta_\phi \geq 0,5^\circ$ по моменту затяжки, который выходит из поля допуска. При совместном влиянии погрешностей отказы по моменту затяжки наблюдаются при $\Delta_z \geq 0,6$ мм и $\Delta_\phi \geq 12^\circ$. Явление отказа сопровождается резким повышением сборочных усилий. Зона надежной компенсации сборочных погрешностей, определяемая по (6), зависит от длины и типа шлица и формы головки винта. Для прямых шлицев при жесткой сборке она не превышает круга радиуса $R = \delta/4 \cdot \cos \theta$, где δ - длина шлица, для крестовых шлицев - $R = \delta/2$, где δ - зазор между отверткой и шлицами. Смещение осей на величину $\Delta_z \geq \delta/2$ приводит к полному отсутствию момента затяжки в соединении, к срывам шлицев.

На основании расчетов и экспериментов было изготовлено оригинальное компенсирующее устройство, размещаемое на ПР с завертывающей машиной, имеющей упругие перемещения по 5 степеням свободы, кроме вращения вокруг оси. Жесткости устройства составляют: вертикальная по оси сборки - 7,5 Н/мм, горизонтальная - 4 Н/мм, крутильная вокруг горизонтальных осей - 88 Нм/рад и 1300 Нм/рад-вокруг вертикальной. Устройство обеспечивает безотказную сборку РС обычными и самонарезающими винтами в пределах погрешностей $\Delta_z \leq 5$ мм и $\Delta_\phi \leq 10^\circ$.

Проведены исследования по определению влияния технологичности конструкций собираемых и крепежных деталей и режимов сборки на безотказность процесса при сборке РС с компенсирующим устройством. Увеличение высоты присоединяемой детали требует снижения жесткостей устройства на 10-20 %. Применение винтов с центрирующими заточками не влияет на улучшение наживления, происходящего безотказно при усилиии $F_z \geq 1$ Н. Автопоиск такими винтами за пределами басок невозможен. Центром настройки для них является центр отверстия присоединяемой детали, при этом можно увеличить скорость сборки на 15-20%, а

для РС с плоским торцом - кромка отверстия или фаски. Форма головки и шлица винта не влияют при сборке с компенсирующим устройством на размеры зоны надежной компенсации.

Записанные реальные траектории центра торца винта соответствуют расчетным по (9) с погрешностью до 20%. Усилия сборки снижаются и не превышают $F_z = 10 \text{ Н}$, $F_x = F_y = 5 \text{ Н}$.

Доказана возможность безотказной роботизированной сборки самонарезающимися винтами и шурупами РС с базовыми деталями с поперечными отверстиями (из материалов: древесины, фанеры, ДСП, пластмасс, проката сплавов Д16, АД31 и стали 08пс) и без отверстий (базовые детали из металлического листа и мягкой древесины). Наибольшее влияние на отказ по моменту затяжки оказывают диаметр отверстия и угол перекоса осей винта и отверстия. Необходимо использовать жесткие ($j \geq 100 \text{ Н/мм}$) и точные (в пределах зазоров винта и отверстия присоединяемой детали) ПР. Винт должен базироваться в пазовых губках с угловой погрешностью $\Delta \leq 0,5^\circ$. Следует синхронизировать вращение и подачу винта в пределах $\pm 1-2 \%$, в противном случае возможен срыв резьбы.

Установлено, что основной причиной отказов (до 80%) являются отказы по некачественному изготовлению деталей. Отказы ПР и контрольных устройств редки.

Для получения заданной производительности сборочного ГАП требуется увеличить размер партии до Z' штук:

$$Z' = Z / \prod_{i=1}^n p_i \quad (16)$$

где Z - расчетный размер партии; p_i - вероятность попадания i -ой годной детали; n - число деталей, собираемых на позиции. Для винтов МЗ-М5 $\prod_{i=1}^n p_i \geq 0,94$ при $n \leq 10$, что требует увеличения расчетной партии Z изделий на 6-10 %. При этом штучное время $t_{шf}$ следует рассчитывать по:

$$t_{шf} = t_{шf}^0 \prod_{i=1}^n p_i - (1 - \prod_{j=1}^K p_j p_{\Sigma}) t_{\Sigma 0}, \quad (17)$$

где $t_{шf}^0$ - расчетное штучное время; p_j, p_{Σ} - вероятности безотказной работы контрольных устройств и общей системы управления ГАП соответственно; p - общая вероятность безотказной работы сборочного комплекса; $t_{\Sigma 0}$ - время устранения отказов в комплексе; K - число контрольных устройств.

Приведены экспериментальные данные по длительности цикла сборки РС. Вероятность безотказной работы комплекса сборки РС при ис-

пользовании разработанного устройства компенсации погрешностей возрастает до $P = 0,9\%$, что позволяет за счет увеличения на 15-20 % скоростей сборки обеспечить заданную производительность.

Проведены испытания устройства компенсации на безотказность по 1000 циклам при сборке электромагнита МР-5202 КУЗ. Получена 100%-ная безотказность сборки винтами М4х25 ГОСТ 17473-80 с заостренными концами при точности позиционирования $PR \pm 1,2$ мм.

В пятой главе приведена методика проектирования технологии роботизированной сборки РС. Она описывает последовательность и содержание действий технологов и конструкторов при разработке технологии и комплекса средств осуществления роботизированной сборки РС. Приведены технические данные и описание работы РК сборки РС. Комплексы необходимо снабжать контрольными устройствами на основе микропроцессоров. При этом математическое ожидание времени выполнения сборки партии Z' штук j -го изделия будет минимальным. При постоянном контроле, обеспечиваемом этими устройствами, режимов сборки достигается максимальная производительность за счет уменьшения времени обнаружения и устранения отказов.

Разработана самонаводящаяся головка для ПР, позволяющая осуществлять непрерывный контроль процесса сборки по сборочным усилиям, получаемым с датчиков, размещенных в головке и связанных со схватом. Сигналы с датчиков обрабатываются микропроцессором, который управляет ПР, производящим замену бракованных деталей, или сигнализирует о неустранимом отказе диспетчеру.

Рассмотрены перспективные направления исследований и практических разработок роботизированной сборки, к которым относится сборка высокоточных соединений с зазором.

В приложениях к работе приведена программа моделирования динамики сборки с комментарием пользователю и примеры графического изображения решений.

ВЫВОДЫ

I. На основе выявленных закономерностей протекания процессов сборки РС во времени разработаны динамические математические модели этапов процесса, позволяющие рассчитать параметры компенсирующих механизмов и режимы сборки по заданной точности позиционирования ПР и изготовления изделий или определить тре-

бования к ПР по скоростям, жесткостям и точности позиционирования при заданных параметрах механизмов компенсации и точности изготовления оснастки.

2. Производительность роботизированной сборки РС может быть повышена в 2-9 раз в сравнении с одноинструментной последовательной структурой за счет снижения вспомогательного и подготовительного-заключительного времени, достигающих 70 % времени цикла, в предложенных структурных схемах технологических процессов сборки РС.

3. Размеры радиуса зоны надежной компенсации при жесткой сборке не превышают величины $R = \delta/4 \cos \theta$, где δ - длина прямого шлица, $\theta \leq 0,5^\circ$ - угол перекося осей инструмента и отверстия; $R = \delta/2$ - для крестового шлица, где δ - зазор между лезвием отверстия и шлицем.

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований предложен эффективный способ компенсации погрешностей при сборке РС.

4. Использование разработанного и испытанного устройства компенсации погрешностей при сборке РС обычными и самонарезающими винтами обеспечивает безотказную сборку в диапазоне $\Delta_z \leq 5$ мм и $\Delta_\phi \leq 10^\circ$ с заданным качеством по моменту затяжки (разброс до 10%), без повреждения собираемых деталей.

Размеры зоны надежной компенсации ограничены кругом радиуса $d_0/2$, где d_0 - диаметр отверстия присоединяемой детали. Применение компенсирующего устройства позволяет снизить точность изготовления сборочной оснастки до 9-10 квалитетов и применять для сборки РС ПР с точностью позиционирования до $\pm 1,5-2$ мм. Жесткость ПР в рабочем пространстве должна превышать жесткость компенсирующего устройства не менее, чем на порядок.

5. Для безотказной роботизированной сборки самонарезающими винтами и шурупами РС с базовыми деталями с подготовленными отверстиями и высотой присоединяемой детали $h \geq d_0$, где d_0 - диаметр отверстия, при сборочных погрешностях $\Delta_z \leq 5$ мм и $\Delta_\phi \leq 10^\circ$ необходимо применять разработанное компенсирующее устройство. Допуск на изготовление отверстий под самонарезающие винты $+0,06$ мм, что обеспечивает разброс момента затяжки до 10 %.

6. Для безотказной роботизированной сборки самонарезающими винтами и шурупами РС с базовыми деталями из листовых металлов (Д16, АЛ31, 08пс) и мягких древесин без подготовленных отверстий необходимо использовать жесткие ($j > 100$ Н/мм) и точные (в преде-

лах зазоров винта и отверстия присоединяемой детали) ПР. Винт должен базироваться в цанговых губках с угловой погрешностью

0,5°. Следует синхронизировать подачу и вращение винта в пределах $\pm 1-2\%$, в противном случае возможен срыв резьбы.

7. Для повышения производительности роботизированной сборки РС в условиях ГАП необходимо обеспечивать 100%-ный контроль деталей для исключения отказов из-за некачественного их изготовления. При невозможности контроля следует увеличить размер партии на расчетную величину и уменьшить соответственно штучное время по разработанной методике. Проверка на партии 1000 штук годных деталей подтвердила 100%-ную безотказность сборки РС разработанным компенсирующим устройством.

8. Разработана методика проектирования технологии роботизированной сборки РС в условиях ГАП, позволяющая научно обоснованно по заданным характеристикам изделий и соединений выбирать удовлетворительные по производительности структуры процесса и компоновки сборочного комплекса, рассчитывать нормы времени, требуемую точность и другие параметры оснастки и ПР и режимы для безотказной сборки изделий с заданным качеством.

9. Внедрение результатов работы в проектно-институте ВНИТИ. Прибор МНПО "ТЕМП" позволяет вести научно обоснованное проектирование технологии сборки и оборудования сборочных ГАП и сократить проектные сроки. Внедрение разработанного роботизированного комплекса сборки РС на предприятиях Минприбора и смежных отраслей позволит снизить трудоемкость сборки на 18-25 %, высвободить 3 рабочих. Ожидаемый экономический эффект от внедрения РК сборки РС не менее трех тыс. рублей в год.

Основные положения и результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Алексеев А.В. Требования к сборочным устройствам для оснащения промышленных роботов. - Опыт разработки и внедрения автоматических манипуляторов и технологических комплексов с их использованием: Тезисы докладов всесоюзного научно-технического семинара. - М., 1982, с.47-49.

2. Алексеев А.В., Попов М.Л. Критерии выбора типа промышленного робота при автоматизации сборочных процессов. - Опыт разра-

ботки и внедрения передовых технологических решений в области сборочного производства на предприятиях Минсельхозмаша: Тезисы докладов научно-технической конференции. - Павлодар, 1982, с.28-30.

3. Алексеев А.В. Технологическая оснастка сборочных роботов. - Технология машиностроения для легкой и пищевой промышленности и бытовых приборов, 1982, №7, с.23-24.

4. Корсаков В.С., Алексеев А.В., Егоров В.П. Загрузочные устройства для сборочных роботов. - Состояние и перспективы применения вычислительной техники в машиностроительной промышленности Узбекистана: Тезисы докладов республиканской научно-технической конференции. - Ташкент, 1982, с.93-94.

5. Сборка резьбовых соединений с применением автоматических манипуляторов /В.С.Корсаков, А.В.Алексеев, В.П.Егоров, Б.Д.Максимович. - Механизация и автоматизация производства, 1983, №10, с.2-6.

6. Алексеев А.В. Обеспечение параметрической надежности роботизированной сборки резьбовых соединений. - Повышение эффективности производства механизацией и автоматизацией механосборочных и вспомогательных процессов в машиностроении: Тезисы докладов республиканской научно-технической конференции. - Ташкент, 1983, с. 71-73.

7. Попов М.Д., Алексеев А.В. Структура роботизированных сборочных комплексов и ее связь со структурой технологических процессов сборки. - Автоматизация процессов подготовки производства в машиностроении: Тезисы докладов республиканского научно-практического семинара. Ч.П. - Фрунзе, 1983, с.7-8.

Синица

